

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie mécanique

DÉVELOPPEMENT D'UN ÉCHANGEUR DE CHALEUR EN FABRICATION
ADDITIVE MÉTALLIQUE POUR LA MICROTURBINE INSIDE-OUT
CERAMIC TURBINE

Mémoire de maîtrise
Spécialité : Génie mécanique

Thomas PARENT-SIMARD

Sherbrooke (Québec) Canada

Mai 2019

MEMBRES DU JURY

Pr Mathieu PICARD

Directeur

Pr Vladimir BRAILOVSKI

Codirecteur

Pr Luc FRÉCHETTE

Évaluateur

Pr Jean-Sébastien PLANTE

Rapporteur

RÉSUMÉ

La Inside-Out Ceramic Turbine (ICT) est une microturbine aux pales en céramique conçue pour atteindre de hautes efficacités. Afin de concurrencer les moteurs diesel, son efficacité doit dépasser les 40 %. Les travaux antérieurs ont permis d'augmenter la température d'entrée (TIT) en utilisant la céramique. Pour augmenter son efficacité davantage, il faut la configurer en cycle de Brayton récupéré et l'ajout d'un échangeur de chaleur est nécessaire. Toutefois, les échangeurs ne sont pas utilisés dans le domaine de l'aéronautique en raison de leur masse élevée. La réduction de celle-ci au maximum est nécessaire pour trouver son application dans ce domaine. La fabrication additive est une technique de fabrication prometteuse pour résoudre cette problématique. Cependant, elle induit une rugosité de surface élevée qui fait augmenter le facteur de friction et le transfert thermique. Pour mieux en comprendre les effets, un échangeur de chaleur représentant 1 % (1.5 g/s) du débit total de la ICT a été développé.

D'abord, l'échangeur de chaleur a été conçu et modélisé à l'aide d'un modèle 1D d'éléments finis qui a été préalablement développé. Ensuite, il a été fabriqué par fusion laser sélective sur lit de poudre (LPBF). L'impression a montré que les tolérances du procédé de fabrication, qui sont de l'ordre de 0.1 mm, ont une incidence importante sur les performances puisque les mini-canaux ont de petites longueurs caractéristiques. Une fois fabriqué, l'échantillon a été mis à l'essai avec de l'air chaud. La comparaison des résultats modélisés et expérimentaux a démontré la validité du modèle. Finalement, le prototype a été soumis à un essai sous un environnement de combustion à une température d'entrée de 1123 K durant une heure pour représenter les conditions d'opération actuelles de la turbine. Des analyses visuelles et par microscope ont démontré qu'il n'y avait pas de problème concernant l'oxydation du matériau à court terme.

L'étude de la performance de l'échangeur montre que la fabrication additive permet de réduire la masse de 6 à 13 % pour ce prototype. Ceci est attribué à la rugosité de surface élevée du procédé. Il serait possible de diminuer la masse davantage en effectuant de nouveaux designs de géométries pour augmenter le transfert thermique et qui peuvent être réalisés seulement par fabrication additive. La fusion laser sélective sur lit de poudre est une méthode de fabrication intéressante pour la réalisation d'un échangeur complet pour la ICT.

Mots-Clés : Microturbine, cycle de Brayton récupéré, échangeur de chaleur, fabrication additive métallique, fusion laser sélective sur lit de poudre

REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a pu être réalisé grâce au support et à l'aide de plusieurs personnes.

Tout d'abord, j'aimerais remercier mon directeur de recherche, le Professeur Mathieu Picard de m'avoir permis d'effectuer des études graduées au sein de son groupe de recherche. Merci également pour le support, l'encadrement et les conseils qui m'ont été donnés tout au long de mon parcours. Ces études m'ont permis de me développer et d'acquérir de nouvelles compétences qui me seront fortement utiles tout au long de ma carrière.

Merci également à mon codirecteur, le Professeur Vladimir Brailovski d'avoir effectué un projet en collaboration avec notre groupe de recherche. Vos connaissances et conseils m'ont permis de découvrir le domaine de la fabrication additive. Merci pour votre disponibilité, celle de vos équipements et l'impression de différentes pièces.

Je dois aussi remercier mes collègues de travail du groupe moteur qui m'ont aidé à réaliser mon projet. Ce fut un plaisir de travailler en votre présence. Vous m'avez fait connaître une équipe performante et remplie de passionnés.

J'aimerais remercier Hydro-Québec ainsi que Rio Tinto pour le support financier offert pour la réalisation de ce projet.

Finalement, je tiens à remercier ma famille de m'avoir soutenu tout au long de mes études. Cette aide m'a permis de me consacrer et de m'investir dans ce projet.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
REMERCIEMENTS.....	ii
TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
CHAPITRE 1 - INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte et problématique.....	1
1.2 Question de recherche	3
1.3 Objectifs du projet de recherche.....	3
1.4 Contributions générales.....	4
1.5 Plan du mémoire.....	4
CHAPITRE 2 - ÉTAT DE L'ART	5
2.1 Le projet Inside Out Ceramic turbine (ICT).....	5
2.2 Les turbines récupérées dans le domaine de l'aéronautique	6
2.3 Capstone.....	8
2.4 Michael Vick & al.	10
2.5 Delta Motorsport	12
2.6 La fabrication additive métallique.....	13
2.7 Travaux de Curtis K. Stimpson & al.	15
2.8 Conclusion de l'état de l'art	15
CHAPITRE 3 - ARTICLE.....	17
Avant-propos.....	17
3.1 Abstract	19
3.2 Introduction	19
3.3 Geometry and 3D printing	23
3.4 Analytical development.....	26
3.5 Analytical Results	32
3.6 Experimental validation: Results with air	33
3.7 Experimental validation: Combustion.....	36
3.8 Conclusions	38
3.9 Nomenclature	39

3.10 Acknowledgments	40
CHAPITRE 4 – CONCLUSION	41
LISTE DES RÉFÉRENCES	43

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 – Comparaison entre un cycle de Brayton non récupéré et un cycle de Brayton récupéré avec échangeur de chaleur	1
Figure 2.1 - Essais de la ICT en cycle de Brayton non récupéré à l'automne 2016	5
Figure 2.2 - Principales fuites lors de la mise à l'essai de l'échangeur de chaleur fabriqué en collage par diffusion	6
Figure 2.3 - Microturbine C30 de Capstone en cycle de Brayton récupéré.....	9
Figure 2.4 - Fabrication à l'aide d'une matrice et assemblage d'un récupérateur de microturbine Capstone [18].....	9
Figure 2.5 - Design de microturbine de 11.2 kg produisant 11 kW à 1225 °C de TIT et 2.35 de ratio de pression à 21% d'efficacité par Michael Vick & All [21].....	10
Figure 2.6 - Plaques du récupérateur breveté par Michael Vick [9, 21].....	11
Figure 2.7 - Microturbine de 17 kW en cycle de Brayton récupéré de Delta Motorsport	12
Figure 2.8 - Échangeur de chaleur développé pour Delta Motorsport par HiETA en collaboration avec Renishaw	13
Figure 2.9 – Illustration générale de fabrication additive sur lit de poudre [25]	14
Figure 2.10 – Illustration générale de la fabrication additive par dépôt direct de poudre [25]	14
Figure 2.11 – Illustration générale de la fabrication additive alimentée en fil [25].....	15
Figure 3.1 – Inside-out ceramic turbine (ICT) rotating assembly [4].....	20
Figure 3.2 – CoCr sample heat exchanger fabricated by laser powder bed fusion.....	23
Figure 3.3 – Cut view of the HEx with supported region (red) and build direction	24
Figure 3.4 – Internal view of cold and hot sides plates with channels specifications	24
Figure 3.5 – Microscopic measurements of channels (~0.3 mm) and walls (~0.5 mm) of the LPBF heat exchanger for a 63 x scale	26
Figure 3.6 – Friction factor of rectangular channel DMLS [27].....	27
Figure 3.7 – Nusselt number of rectangular channel DMLS coupons [27]	28
Figure 3.8 – Heat transfer augmentation versus friction factor augmentation of rectangular channel DMLS coupons [27]	29
Figure 3.9 – Heat Exchanger 1D Model description [10].....	30

Figure 3.10 – Comparison of friction factor for parallel plates laminar flow and correlation used for a relative roughness of $\varepsilon/D_h = 0.32$ based on Stimpson’s study	31
Figure 3.11 – Comparison of the pressure drop and efficiency predictions for true channel dimensions versus as-designed	32
Figure 3.12 – Test bench to evaluate the efficiency and pressure drop of the HEx with hot air..	33
Figure 3.13 – Comparison between the 1D model and the experiments for the pressure drop on the hot side of the HEx.....	35
Figure 3.14 – Comparison between the 1D model and the experiments for the efficiency of the HEx	36
Figure 3.15 - Test bench to simulate operations conditions of the ICT turbine on the sample LPBF HEx.....	37

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Salient features of early recuperated turbines aeroengines.....	7
Tableau 2.2 : Summary of recuperated gas turbine concepts studied in the past [15].....	8
Table 3.1 - Specifications of the channels	25
Table 3.2 – Experimental results of the HEx for various air mass flow rates	34

CHAPITRE 1 - INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte et problématique

La conscience environnementale et l'économie font en sorte que les fabricants de moteurs thermiques cherchent à diminuer la quantité de polluants qu'ils produisent tout en augmentant leur efficacité. Les microturbines sont une alternative intéressante aux moteurs à pistons diesel en raison de leurs faibles émissions, de leur niveau de bruit plus bas, de leurs vibrations moins élevées et de leur rapport poids-puissance supérieur. Cependant, elles ont une consommation de carburant élevée [1]. Une avenue intéressante pour diminuer cette consommation est d'augmenter la température en entrée de turbine (TIT). Afin de surpasser la limite thermique des superalliages, différents concepts de rotor de turbines en céramique ont été développés. Ceux-ci se sont avérés peu fiables et inadaptés en raison des risques de défaillance. Pour remédier à ce problème, la Inside-Out Ceramic Turbine a été développée [2-4]. Ce concept vise à utiliser des pales de céramique qui sont retenues en compression plutôt qu'en tension. La raison de ce concept est que la céramique est environ huit fois moins résistante en tension qu'en compression. Afin de diminuer davantage la consommation de carburant, il faut ajouter un échangeur et opérer en cycle de Brayton récupéré [5]. La Fig. 1.1 présente les configurations non récupérées et récupérées du cycle de Brayton.

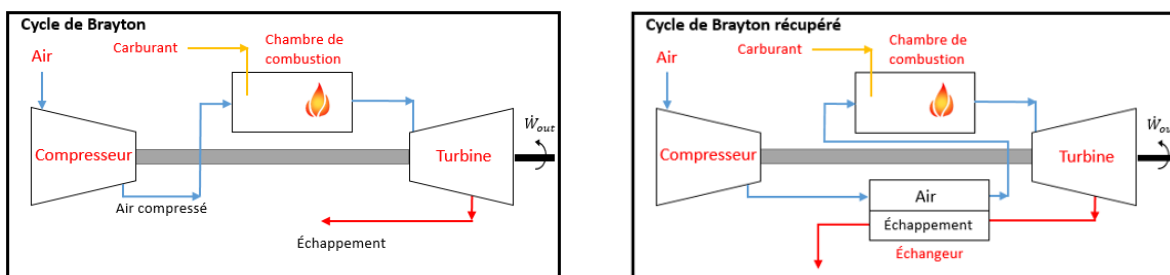


Figure 1.1 – Comparaison entre un cycle de Brayton non récupéré et un cycle de Brayton récupéré avec échangeur de chaleur

Un échangeur en céramique pourrait opérer à des températures en entrée de turbine qui sont près de 1800 K, ce qui permettrait l'atteinte d'efficacité avoisinant 50%. Par contre, les travaux précédents ont montré qu'il est difficile de mettre en place des échangeurs en céramique en raison des fissurations qui apparaissent durant leur fabrication ou opération [6-9]. À court et moyen

terme, le TIT visé pour la ICT est de 1550 K, ce qui permettrait d'atteindre une efficacité entre 40 et 50 % dépendamment de la densité de puissance visée [10]. Pour ce TIT, la température en sortie de turbine (TOT) serait de 1055 K. Celle-ci permet l'utilisation d'un échangeur de chaleur métallique capable de résister en termes de contraintes et d'oxydation. Toutefois, l'ajout d'un échangeur augmente la masse du système. Pour des équipements mobiles, il faut également plus de carburant pour transporter cette masse, ce qui fait en sorte que les turbines récupérées peuvent être moins efficaces que celles non récupérées. Pour cette raison, les échangeurs de chaleur n'ont pas été adaptés à l'aéronautique jusqu'à présent. Pour qu'ils soient adaptés à ce domaine, ils doivent être légers, peu volumineux, entraîner peu de pertes de charge et être résistants aux hautes pressions et températures tout en demeurant abordables [11]. Les procédés de fabrication utilisés actuellement pour la fabrication d'échangeurs de chaleur sont le brasage, le collage par diffusion et l'empilement de plaques métalliques 2D soudées qui ont été découpées préalablement par laser. Ces procédés s'avèrent compliqués, coûteux et demandent beaucoup de temps [12]. Ils sont également moins appropriés au développement de prototypes et restreignent la liberté de design des échangeurs, ce qui limite le transfert thermique. La fusion laser sélective sur lit de poudre est une technique de fabrication additive prometteuse. Elle ouvre un nouvel espace de design et est une méthode de fabrication intéressante pour des échangeurs de chaleur de petite taille. Ce procédé induit une rugosité de surface élevée et peu d'études traitent l'effet de celle-ci sur le transfert thermique et le facteur de friction pour des mini-canaux. Il est crucial d'étudier cet aspect afin de déterminer si la fabrication additive demeure un procédé viable pour des échangeurs de chaleur de microturbines.

Pour évaluer si le compromis entre l'augmentation du transfert thermique et le facteur de friction est intéressant, il est possible de l'évaluer avec le facteur de performance P présenté à l'Eq. 1.1. Cette relation compare la performance pour deux cas ayant les mêmes pertes de charge [13].

$$P = (Nu/Nu_0)/(f/f_0)^{1/3} \quad (1.1)$$

Où Nu est le nombre de Nusselt et f le facteur de friction. Cette équation compare les résultats obtenus avec des canaux ayant une rugosité de surface élevée (Nu , f) à ceux attendus pour un même design ayant des canaux lisses (Nu_0 , f_0). Lorsque le facteur de performance P est supérieur à 1, le transfert thermique est augmenté suffisamment pour compenser l'augmentation du facteur de friction. Dans ce cas, il est possible de réduire la masse pour les mêmes requis d'efficacité et

pertes de charge en raccourcissant l'échangeur. Si l'indicateur de performance est de 1, la rugosité n'a pas d'influence sur la performance du système. Finalement, dans le cas où P est plus petit que 1, l'augmentation des pertes de charge ne peut pas être compensée par celle du transfert thermique et la pièce ne pourra pas être redésignée pour être plus performante.

1.2 Question de recherche

Le but de cette maîtrise est de développer un échangeur de chaleur en fabrication additive pour augmenter le rendement de la microturbine ICT. La question de recherche qui y est associée est la suivante :

« Est-ce que la fabrication additive métallique permet de développer un échangeur de chaleur plus léger que les méthodes conventionnelles tout en étant adapté aux requis de la turbine ICT et capable d'opérer à une température de 755 °C? »

Pour répondre à cette question, il est nécessaire de bien comprendre ce que comporte la fabrication additive métallique et quels sont ses effets sur la performance d'un échangeur de chaleur. Il faut également comprendre quels sont les avantages et limitations que le procédé peut offrir en termes de géométrie, tolérances et taille des pièces.

1.3 Objectifs du projet de recherche

L'objectif principal du projet de recherche est de développer un échangeur de chaleur qui répond aux besoins de débit et de taux de transfert de chaleur pour la configuration actuelle de la turbine ICT. Les objectifs spécifiques qui sont rattachés au projet sont :

1. Concevoir un échangeur de chaleur représentant environ 1 % (1.5 g/s) du débit total requis par la turbine ICT à l'aide du modèle d'éléments finis 1D préalablement développé par Alexandre Landry-Blais.
2. Fabriquer l'échangeur de chaleur par fusion laser sélective sur lit de poudre et le mettre à l'essai.
3. Valider et améliorer le modèle 1D à l'aide des résultats expérimentaux.
4. Opérer l'échangeur au TOT actuel de la turbine qui est de 755 °C et observer le niveau d'oxydation de la pièce.

5. Déterminer si la fabrication additive est un procédé de fabrication qui permet de réduire la masse des échangeurs de chaleur.

1.4 Contributions générales

La fabrication additive par fusion laser sélective sur lit de poudre est une méthode de fabrication récente, ce qui fait en sorte qu'il existe peu de travaux sur son utilisation pour des échangeurs de chaleur dans le domaine des turbines à gaz. Les travaux effectués figurent donc dans les premiers concernant son utilisation dans ce domaine.

Seulement un échangeur de microturbine a été réalisé jusqu'à présent. Il s'agit d'un partenariat HiETA-Renishaw, mais aucune publication ou article a été trouvé sur ce sujet. Il s'agit donc du premier échangeur de chaleur imprimé et mis à l'essai qui fera l'objet de publication scientifique.

1.5 Plan du mémoire

Ce mémoire de maîtrise comporte quatre chapitres. Le premier concerne la mise en contexte du projet. Le second est dédié à l'état de l'art. Dans celui-ci, différents prototypes et analyses d'échangeurs de chaleur seront présentés. Le choix des matériaux et les diverses techniques de fabrication y seront également abordés. Le troisième chapitre présente un article scientifique dans lequel l'effet de la rugosité de surface sur l'efficacité et les pertes de charge d'un échantillon d'échangeur est étudié. L'article traite également du comportement du Cobalt-Chrome (CoCr) à haute température et sous un environnement de combustion. Le quatrième chapitre présente les conclusions du projet de recherche ainsi que les avantages et désavantages liés à la fabrication additive métallique par fusion laser sélective sur lit de poudre.

CHAPITRE 2 - ÉTAT DE L'ART

En se référant aux travaux des autres projets similaires, il est possible de mieux se positionner et de voir quels sont les avantages et inconvénients des différents choix possibles. L'étude permet également de comprendre quels ont été les défis à relever et qui sont les autres joueurs dans le domaine des microturbines. Un compte rendu de la ICT est également dressé afin de présenter les avancements de ce projet.

2.1 Le projet Inside Out Ceramic turbine (ICT)

Lors des essais à chaud de la ICT à l'automne 2016, la turbine était en cycle de Brayton non récupéré. Cette configuration est présentée à la Fig. 2.1 :

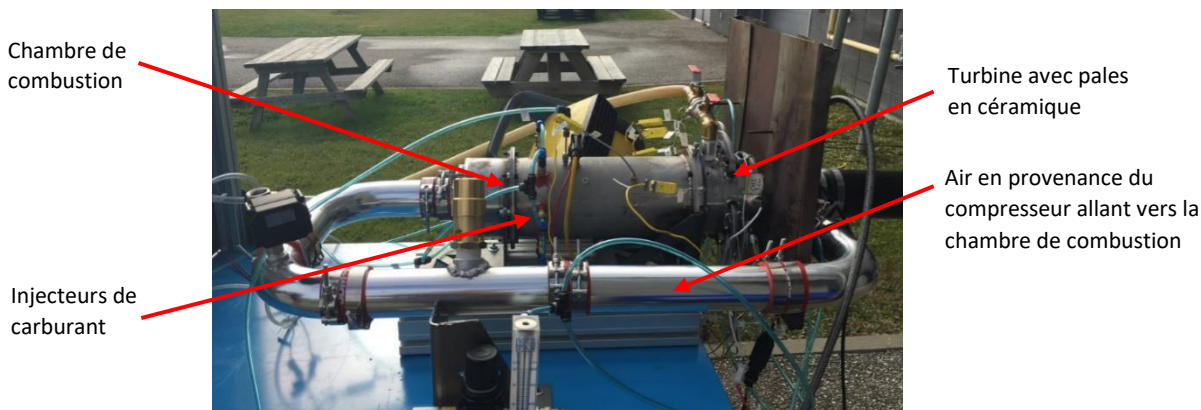


Figure 2.1 - Essais de la ICT en cycle de Brayton non récupéré à l'automne 2016

Les avancées sur le projet ont permis, à présent, de développer une turbine avec des pales en céramique et de l'opérer dans un banc d'essai à chaud à diverses reprises. Comme la turbine n'a pas de récupérateur, il sera difficile d'obtenir des rendements suffisants pour faire concurrence au marché dans les applications visées. Le développement d'un échangeur de chaleur pour configurer la turbine en cycle de Brayton récupéré, tel que présenté à la Fig. 1.1 est donc nécessaire. Plus d'informations sur le développement de cette microturbine seront présentées au chapitre 3. À court et moyen termes, le TIT visé pour l'opération de la turbine est de 1550 K, ce qui permettrait d'atteindre une efficacité de 40 à 45% dépendamment de la densité de puissance [10]. La température du gaz en sortie de turbine (TOT) serait à environ 1055 K. La configuration actuelle du banc d'essai a un débit total de 120 g/s et un ratio de pression de 3. Afin de permettre une bonne

opération de la turbine, l'équipe a déterminé que les pertes de charge dans l'échangeur doivent être inférieures à 4% de la pression à l'échappement et de 1% à l'admission.

Au début de la maîtrise, un échangeur de chaleur en plaques a été développé et mis à l'essai. Celui-ci avait été fabriqué en collage par diffusion. Au cours des essais, il y a eu plusieurs problèmes concernant les fuites. Elles provenaient surtout de la délamination des plaques ainsi que des interfaces entre les collecteurs d'admission et d'échappement. La Fig. 2.2 présente cet échangeur de chaleur une fois les premiers essais terminés :

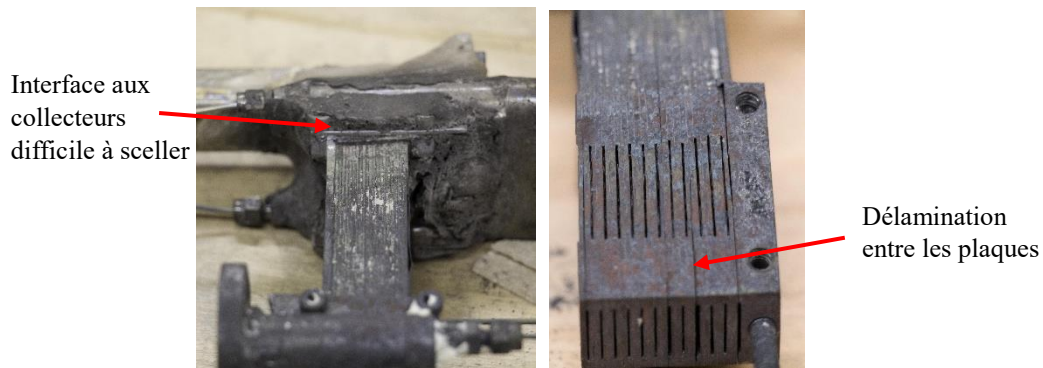


Figure 2.2 - Principales fuites lors de la mise à l'essai de l'échangeur de chaleur fabriqué en collage par diffusion

L'échangeur de chaleur, fait d'acier inoxydable 316, a également présenté un problème de corrosion. Les essais réalisés ont montré que le collage par diffusion présente des risques quant à l'intégrité et l'étanchéité de l'échangeur s'il n'est pas effectué de manière optimale. Il a été déterminé qu'il faut également réduire le nombre d'interfaces pour diminuer ces risques. Bien que le collage par diffusion soit une méthode de fabrication fréquemment utilisée dans le monde des échangeurs de chaleur, il s'agit d'un procédé difficile à maîtriser et à mettre en place. Dans le cadre de cette recherche, il s'avérait trop complexe de poursuivre avec cette méthode pour développer un prototype rapidement.

2.2 Les turbines récupérées dans le domaine de l'aéronautique

Les premières turbines à cycle récupérées à être utilisées dans le domaine de l'aéronautique ont pris naissance en 1945 avec la Bristol Theseus. Le Tableau 2.1, réalisé par McDonald présente les premières turbines récupérées qui ont été mises à l'essai entre 1945 et 1970 [14].

Tableau 2.1 : Salient features of early recuperated turbines aeroengines

Engine	Bristol Theseus	Modified Lycoming T53-L-9	Modified Allison T56-A-7 Allison T78-A-2		Modified Allison T63-A-5	Engine study
Year	1945	1965	1964	1965	1967	1970
Engine type	Turboprop	Turboshaft	Turboprop	Turboprop	Turboshaft	Turboshaft
Application	Commercial airliner	Helicopter	Experimental engine	Proposed ASW patrol aircraft	Light observation helicopter	Military helicopter
Demonstration goal	Fuel savings of 150 gallons/h	Increased range at part power	Initial test of recuperated version of T56 engine	Increased loiter time at part power	Flight demonstration of recuperated propulsion engine	Optimized annular recuperator wrapped around the engine
Engine power, (eshp)	2,200	1,100	4,050	4,125	280	963
Compressor type	Axial/radial	Axial/radial	Axial	Axial	Axial/radial	Axial/radial
Turbine type	Axial	Axial	Axial	Axial	Axial	Axial
Airflow (lb/s)	30.0	10.7	33.0	33.0	2.8	5.0
Compressor pressure ratio	5.0	6.3	9.25	11.7	6.2	9.0
Turbine Inlet Temperature (°F)	1,382	1,720	1,970	2,060	~1,770	2,300
Specific fuel consumption (lb/hp h)	0.60	0.52	~0.50	0.417	0.587	0.365
Specific Power (hp/lb/s)	73	103	123	125	100	193
Engine length (in.)	106	88	167	159	40	30
Engine diameter (in.)	48	34	66	36	33	23.5
Engine dry weight (lb)	2,130	810	1,833	1,564	185	203
Specific weight (hp/lb)	1.03	1.36	2.2	2.64	1.51	4.75
Experimental/development recuperated propulsion engine status/experience	During initial run in 1945, the recuperator failed. Further development work continued only on simple cycle version	Fuel savings of 24 percent at 75 percent normal rated power demonstrated. This recuperated engine was never deployed	SFC reduction of 36 percent at part power demonstrated	The T78 engine was built and tested but was not deployed	Engine completed 50 h flight worthiness test successfully in modified YOH-6A helicopter. Demonstrated 25.7 percent increased range over simple cycle engine	Paper design indicated 28 percent reduction in sfc compared with simple cycle version

À cette époque, le prix du carburant et les normes environnementales n'étaient pas un enjeu tel qu'il l'est aujourd'hui. Le développement d'échangeurs a été fait à la base dans le but d'augmenter la distance parcourue avec un seul plein. La turbine Allison T63-A-S modifiée a été opérée durant 50 heures et a démontré une réduction d'environ 26 % de carburant. Selon l'auteur, il s'agit probablement du seul vol habité réalisé avec une turbine récupérée comme seule source de propulsion dans l'Occident. Malgré plus de 200 heures d'essais, les doutes quant à l'intégrité structurelle et la fiabilité des échangeurs ont persisté [14]. La combinaison de ces différents facteurs a fait en sorte que le développement des turbines récupérées est demeuré restreint.

Des années 70 à aujourd'hui, quelques concepts de turbines récupérées pour l'aéronautique ont été étudiés, mais aucun n'a été développé et mis à l'essai. Le Tableau 2.2 présente les différents concepts étudiés.

Tableau 2.2 : Summary of recuperated gas turbine concepts studied in the past [15]

Engine study	1,000 hp turboshaft concept	500 hp turboshaft concept	250 hp turboprop concept	1,340 hp turboshaft concept	Projected 1,000 hp turboshaft
Year	1970	1980	1984	1995	2010-2015
Application	Helicopter	Helicopter	Small computer plane	Helicopter	Helicopter
Engine cycle	Recuperated	Recuperated	ICR	Recuperated	Recuperated
Compressor type	Axial/radial	Radial	Two Stage radial	Radial	Radial
Turbine type	Axial	Radial/axial	Radial	Axial	Axial
Turbine material	Metallic	Metallic	Ceramic	Metallic	Metallic
Turbine inlet temp. °F	2,300	2,300	2,500	2,420	2,300
Pressure ratio	9	10	6	8	9
Heat exchanger type	Recuperator	Recuperator	Rotary I/C and regen.	Recuperator	Recuperator
HX construction	Tubular	Tubular	Discs	Tubular	Tubular
HX material	Inconel 625	Inconel 625	Ceramic	Ceramic	Inconel 625
Effectiveness	0.65	0.70	0.94	0.70	0.70
SFC, lb/hp. hr	0.365	0.425	0.252	0.390	0.340
Thermal efficiency (percent)	37.8	32.4	54.8	35.4	40.6
Sp. power, hp/lb/s	193	153	—	182	215
Engine specific weight, hp/lb	4.75	1.67	0.50	—	>5.0

Dans cette période, les contributions majeures pour augmenter l'efficacité des turbines ont été réalisées sur des turbines non récupérées. Ces avancements ont permis d'augmenter les ratios de pression, d'opérer à des TIT plus élevés et de développer des composantes plus efficaces. Les avancements en continu sur l'amélioration des turbines à gaz non récupérées, l'augmentation d'efficacité non nécessaire en raison du prix des carburants qui était bas et le désintérêt de modifier l'architecture des turbines a fait en sorte que peu de travaux sur les turbines récupérées pour l'aéronautique ont été effectués [15].

Présentement, nous entrons dans une ère où les échangeurs de chaleur sont intéressants pour ce domaine en raison des besoins grandissants de réduction d'émissions, de réduction de consommation de carburant en raison de la hausse de leurs prix ainsi que de l'atténuation du bruit des moteurs. De nos jours, les échangeurs de chaleurs ont prouvé leur fiabilité dans les applications stationnaires, mais leur masse demeure trop élevée pour l'aéronautique [16].

2.3 Capstone

Capstone est une compagnie américaine de microturbines qui se spécialise dans des applications stationnaires. Ils offrent des turbines allant de 30 kW à 200 kW. La turbine présentée à la Fig. 2.3 est celle qui se compare le mieux au projet ICT. Il s'agit de la C30, une turbine de 30 kW configurée en cycle de Brayton récupéré et ayant une efficacité thermodynamique de 35% (prédit) [17].

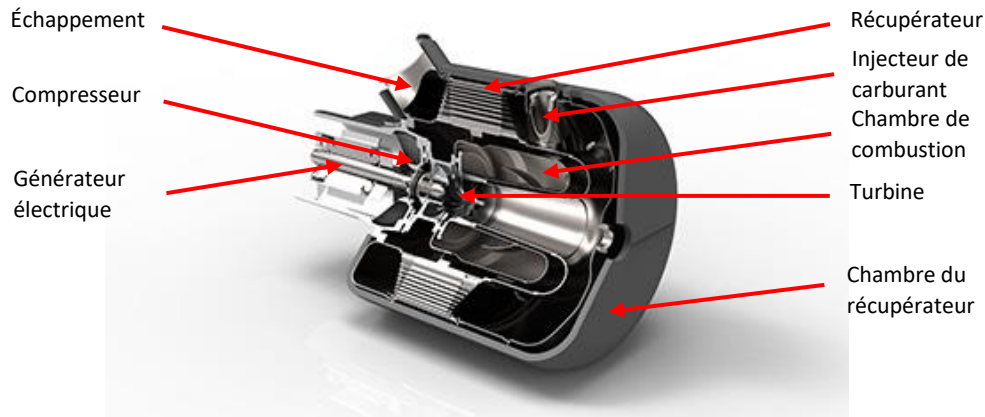


Figure 2.3 - Microturbine C30 de Capstone en cycle de Brayton récupéré¹

Le récupérateur de cette turbine a une efficacité de transfert thermique de 86% et occasionne une perte de charge de 5 %. L'efficacité des microturbines Capstone est restreinte en raison de leur roue de turbine qui est métallique, ce qui limite leur TIT à 1097 K.

Pour leur turbine de 200 kW (C200), Capstone a fait un récupérateur composé d'un ensemble de plaques minces (81 μm) fabriquées à l'aide d'une matrice et ensuite jointes par soudures. Cette méthode est présentée à la Fig. 2.4. Il est fait de feuilles d'acier inoxydable 347 et a une masse totale de près de 500 lb. L'échangeur de la C30 a été conçu selon la même philosophie [18]:



Figure 2.4 - Fabrication à l'aide d'une matrice et assemblage d'un récupérateur de microturbine Capstone [18]

Bien que la masse du récupérateur de la C30 ne soit pas spécifiée par Capstone, une évaluation par Head l'estime à 29.5 kg [19]. Ce type de récupérateur a été inspiré de ceux développés auparavant par Capstone et Solar turbines qui est une division de la compagnie Caterpillar [20].

¹ <https://www.capstoneturbine.com/products/c30>

2.4 Michael Vick & al.

Michael Vick est un ingénieur qui travaille pour le laboratoire de recherche naval des États-Unis. Il vise surtout à développer un échangeur de chaleur en céramique. L'intérêt d'utiliser de la céramique est qu'elle permettrait d'augmenter la température de combustion [9, 21, 22]. À long terme, il veut développer une microturbine de 12 kW qui pourra être utilisée dans des drones. Il vise une masse totale de 11 kg et une efficacité de 21%. La durée de vie visée pour cet équipement est de 1000 heures. La configuration proposée comporte un seul étage de compresseur et de turbine opérant à 1225 °C de TIT et un ratio de pression de 2.35. La Fig. 2.5 présente la microturbine désignée par Vick :

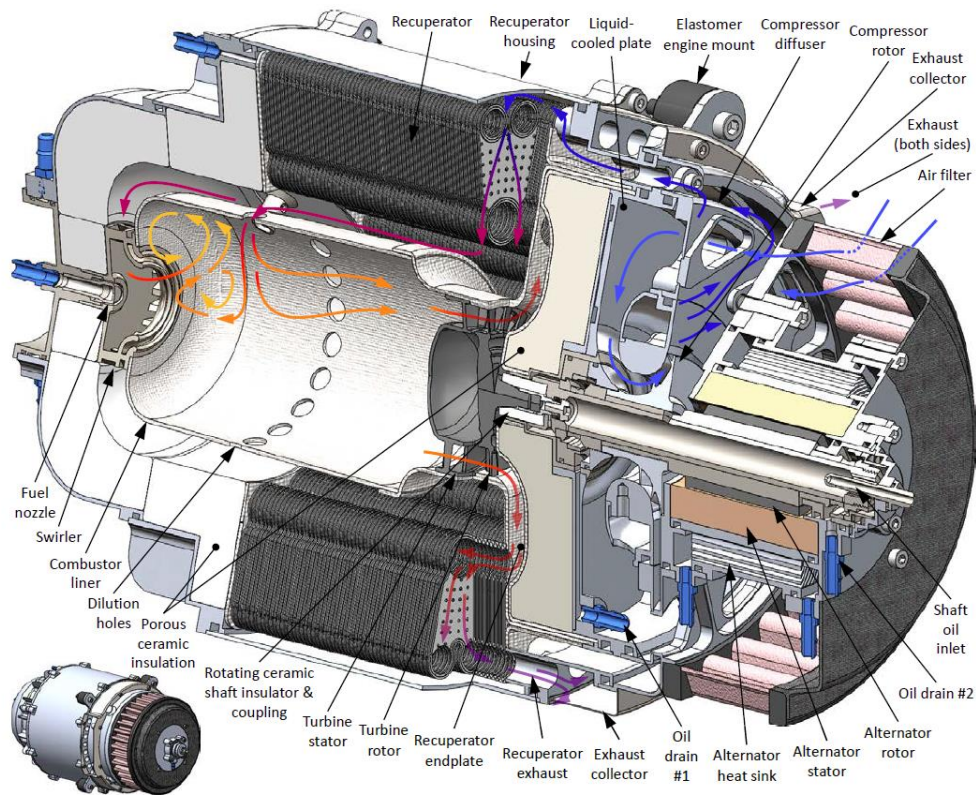


Figure 2.5 - Design de microturbine de 11.2 kg produisant 11 kW à 1225 °C de TIT et 2.35 de ratio de pression à 21% d'efficacité par Michael Vick & All [21]

Dans ce projet, Vick a surtout concentré ses efforts à développer l'échangeur de chaleur en mullite, une céramique. Ce matériau lui permettrait d'atteindre son but principal qui est d'augmenter le TIT à 1225 °C. En plus de résister à de hautes températures, la céramique qu'il a choisie a l'avantage d'avoir une faible densité. La conductivité thermique élevée de la céramique est

également un autre facteur avantageux pour diminuer la masse de l'échangeur. La céramique comporte cependant des désavantages. Le plus important est la fabrication. Les procédés doivent être en mesure d'être répétables, précis, peu coûteux et permettre une flexibilité géométrique. Vick propose, pour ce type d'échangeur, le moulage par injection comme premier choix de fabrication. Le second choix serait de couper les plaques au laser, de les empiler et les assembler par frittage. La troisième possibilité serait la fabrication additive par frittage sélectif par laser, mais il estime qu'il serait difficile d'extraire la poudre qui n'a pas été fusionnée des canaux minces.

Le récupérateur de chaleur a été breveté [23]. Il s'agit d'un élément qui a été fabriqué et mis à l'essai individuellement. Le reste de la turbine n'a pas été fabriqué à ce jour. La Fig. 2.6 présente les plaques d'échangeur qui ont été développées par Vick :

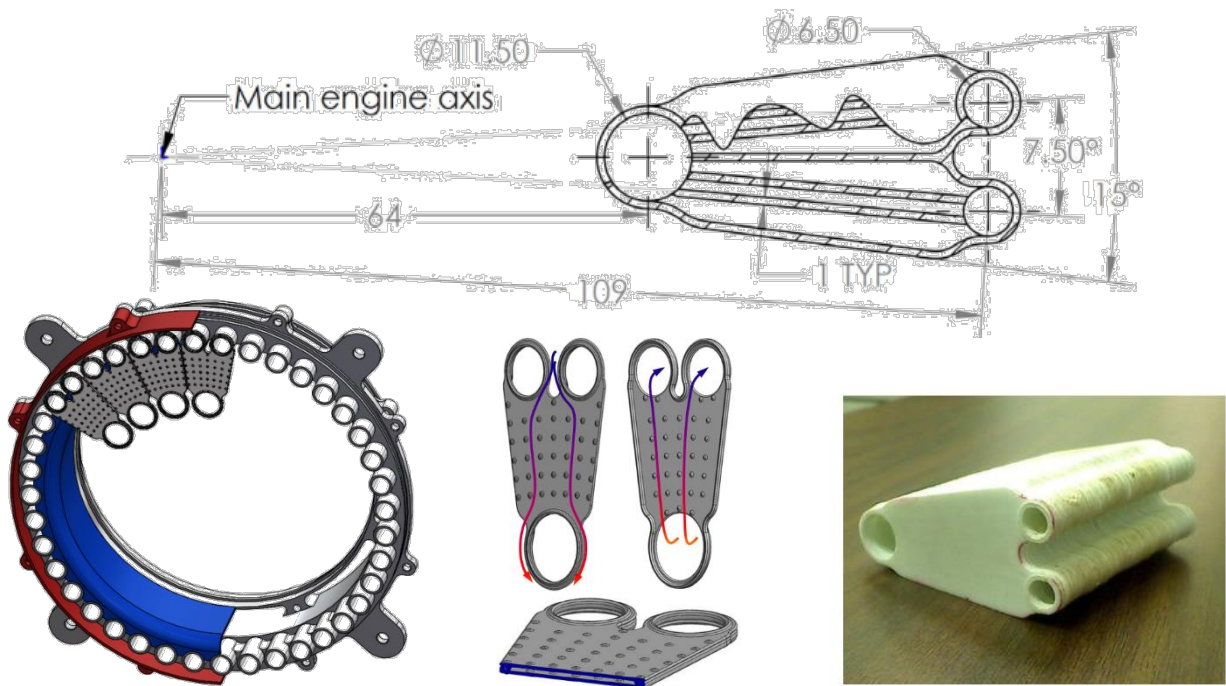


Figure 2.6 - Plaques du récupérateur breveté par Michael Vick [9, 21]

L'épaisseur d'une paire de plaques est de 2 mm. Il souhaite être capable d'atteindre des valeurs de corrosion et érosion à moins de 100 μm par 1000 heures pour une température de 1000 $^{\circ}\text{C}$ pour des canaux ayant une épaisseur de 0.5 mm. Quelques échantillons ont été produits pour cet échangeur, mais il n'a pas été possible d'avoir des propriétés constantes. Vick rapporte également qu'il y avait de la déformation des plaques lors de la cuisson et il faudrait davantage de renforts entre les plaques, ce qui occasionnerait une augmentation des pertes de charge.

2.5 Delta Motorsport

Delta Motorsport est une compagnie qui travaille dans le secteur automobile, plus précisément sur des véhicules électriques et hybrides. Ils ont annoncé l'arrivée de leur unité de puissance auxiliaire composée d'une microturbine permettant d'augmenter l'autonomie des batteries. La Fig. 2.7 présente la microturbine de 17 kW développée par Delta Motorsport [24] :

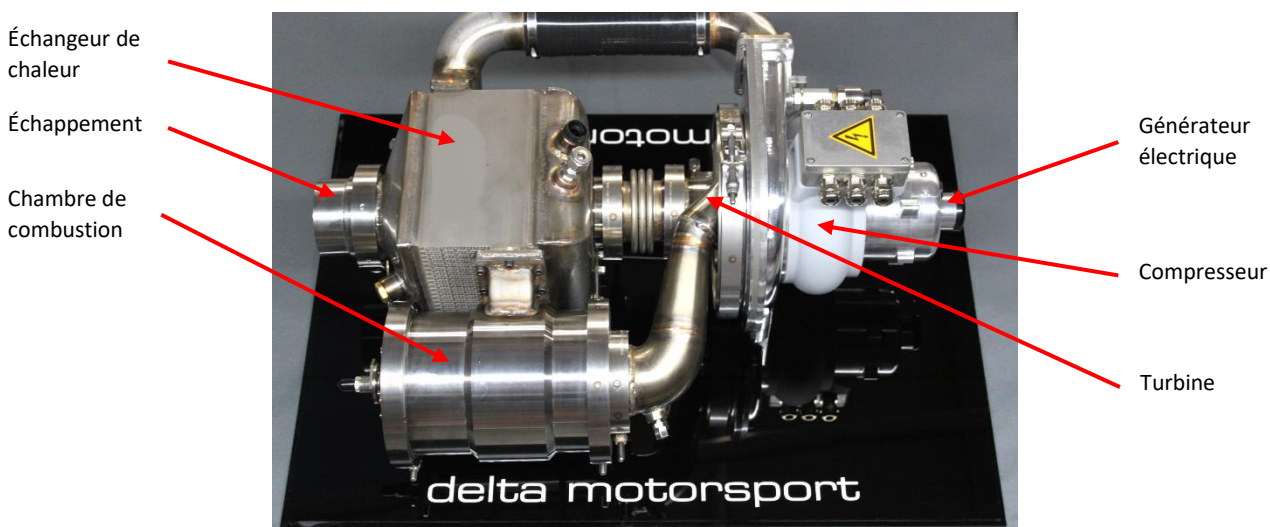


Figure 2.7 - Microturbine de 17 kW en cycle de Brayton récupéré de Delta Motorsport²

Il y a peu d'information sur cette microturbine et aucun vidéo en montrant la mise à l'essai, contrairement à Capstone.

Ils ont développé un échangeur de chaleur en partenariat avec HiETA et Renishaw. Il est fabriqué d'inconel 625 et a des murs d'une épaisseur de 150 microns. Quelques images sont disponibles sur différents sites internet, dont celui de Renishaw, une compagnie qui développe des machines de fabrication additive. Selon eux, pour les mêmes performances qu'un échangeur fabriqué de manière conventionnelle, celui fait par fabrication additive est 30% plus léger et moins volumineux [24]. Cet échangeur de chaleur est présenté à la Fig. 2.8 :

² <https://www.autocar.co.uk/car-news/green-cars/deltas-micro-turbine-range-extender-will-make-production-2019-model>



Figure 2.8 - Échangeur de chaleur développé pour Delta Motorsport par HiETA en collaboration avec Renishaw³

Bien que cet échangeur de chaleur ait été imprimé, il n'y a pas d'information ou d'image concernant son utilisation sur la microturbine développée par Delta Motorsport. Il n'y a donc pas d'information quant aux températures visées et à la durée de vie prévue pour cet échangeur de chaleur. Le matériau de cet échangeur, l'inconel 625 peut être utilisé jusqu'à environ 650 °C lorsqu'il est sous chargements selon les spécifications de EOS⁴. La turbine de Delta Motorsport serait capable d'atteindre une efficacité de 30 à 35%⁵, ce qui indique que cette microturbine opère à des températures d'opération plus basses que celles visées par la ICT. Il s'agit du seul travail trouvé sur un échangeur de chaleur métallique appliqué à une turbine et fait par fabrication additive qui a émergé lors de la recherche bibliographique.

2.6 La fabrication additive métallique

La fabrication additive métallique est un procédé récent qui permet de bâtir des pièces couche par couche par ajout de matière. Elle se divise en trois principales catégories, soit la fabrication sur lit de poudre, la fabrication avec dépôt direct de poudre et la fabrication alimentée en fil.

La fabrication sur lit de poudre est avantageuse lorsqu'on veut faire des pièces nécessitant une bonne résolution, qui a des passages internes ou qui nécessite des tolérances plus serrées. En

³ <https://www.renishaw.com/en/exchanging-metal-3d-printing-solutions-with-hieta--42450>

⁴ https://www.eos.info/eos_binaries0/eos/9a04c87e9c8c16e7/2150114a2db6/NiAlI-IN625-M280_Material_data_sheet_06-17_en.pdfhttp://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/d1327facdca0e32a/373a60ec4f5c891b7dbcdf572e37d3b0/EOS_NickelAlloy_IN625_en.pdf

⁵ <https://www.autocar.co.uk/car-news/green-cars/deltas-micro-turbine-range-extender-will-make-production-2019-model>

revanche, ces machines ont souvent un espace de fabrication qui est généralement plus petit que 0.03 m^3 [25]. La Fig. 2.9 présente un schéma de la fabrication additive sur lit de poudre.

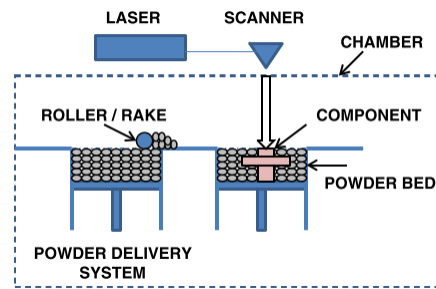


Figure 2.9 – Illustration générale de fabrication additive sur lit de poudre [25]

Une mince couche de poudre est étendue et un laser vient la fusionner aux endroits désirés avec la couche inférieure. Une fois la couche terminée, le racleur étend une nouvelle couche et une nouvelle fusion s'effectue. Ces étapes sont répétées jusqu'à ce que les pièces soient entièrement fabriquées.

La fabrication avec dépôt direct de poudre est une méthode de fabrication qui permet de faire de plus grosses pièces étant donné qu'elle a généralement un volume de fabrication supérieur à 1.2 m^3 . Cette technique est surtout utilisée pour réparer des pièces endommagées ou pour fabriquer des pièces de grande taille [25]. La Fig. 2.10 présente cette méthode de fabrication.

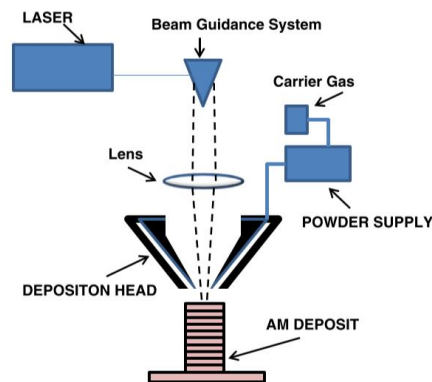


Figure 2.10 – Illustration générale de la fabrication additive par dépôt direct de poudre [25]

La poudre est projetée et fusionnée en même temps. Ce procédé fait en sorte qu'il est plus difficile d'obtenir une bonne précision lorsque l'on fait des murs minces ou des pièces nécessitant plus de précision au niveau du tolérancement comparativement au lit de poudre.

La fabrication alimentée en fil est, quant à elle, une méthode utilisée pour effectuer de grosses pièces et nécessite de faire plus de machinage à la suite de la fabrication que les deux autres méthodes présentées [25]. La Fig. 2.11 présente l'approche de fabrication par alimentation en fil.

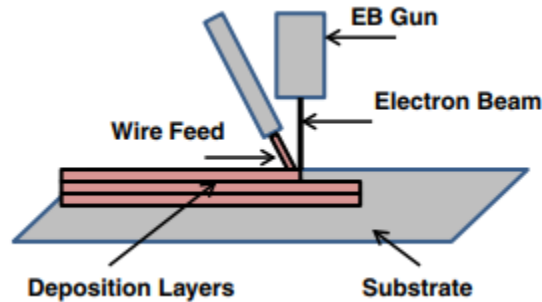


Figure 2.11 – Illustration générale de la fabrication additive alimentée en fil [25]

Ce procédé ressemble beaucoup à de la soudure étant donné que la matière est apportée sous forme de fil et fusionnée. Elle est également moins adaptée pour faire de petites pièces nécessitant des petits passages ou des murs minces étant donné la largeur sur laquelle s'effectue la fusion.

La fabrication additive offre plusieurs avantages comparativement aux techniques de fabrication conventionnelles puisqu'elle ne nécessite pas d'outillage ou de gabarit pour faire les pièces. Il est donc possible de fabriquer des prototypes dans de meilleurs délais [26]. Par contre, elle présente des limitations en termes de coût de production, de temps de fabrication, de répétabilité des pièces et de leur rugosité de surface [26].

2.7 Travaux de Curtis K. Stimpson & al.

La revue de littérature a permis de trouver une étude réalisée par Stimpson & al. dans laquelle des mini-canaux ont été imprimés par fusion laser sélective sur lit de poudre et mis à l'essai [27]. Les résultats de cette étude montrent qu'une rugosité de surface élevée fait augmenter le facteur de friction ainsi que le transfert thermique. Il est donc important de considérer ces résultats pour la fabrication d'un échangeur de chaleur ayant des mini-canaux. Ces travaux seront présentés en détail à la partie 3.4.

2.8 Conclusion de l'état de l'art

L'histoire des turbines récupérées révèle que les échangeurs de chaleur peuvent apporter un gain intéressant en termes de réduction de consommation de carburant et l'efficacité de cycle,

surtout dans le cas de turbines qui opèrent à des ratios de pression relativement bas tel que celui de la ICT. Cependant, la masse des échangeurs de chaleur doit être réduite pour qu'ils puissent être utilisés en aéronautique. L'état de l'art révèle que :

- Les échangeurs de chaleur pour les microturbines à usage stationnaire tels que ceux de Capstone sont fiables et capables d'opérer aux conditions d'opérations requises, mais ont une masse trop élevée en raison de leur efficacité élevée et leur composition en acier inoxydable.
- Les échangeurs en céramique tels que celui réalisé par Vick ont le potentiel d'opérer à haute température, mais sont difficiles à fabriquer. Il serait difficile de réaliser un échangeur en entier au cours d'une maîtrise avec les ressources disponibles.
- La fabrication additive semble pouvoir offrir une grande réduction de masse et de volume pouvant aller jusqu'à 30 % tel que l'échangeur fabriqué par Delta Motorsports. Cette méthode de fabrication se prête bien au contexte académique et il n'y a pas de travaux dans la littérature qui présentent des échangeurs de chaleurs réalisés par fabrication additive.
- La fabrication additive produit des pièces ayant une rugosité de surface élevée, ce qui a comme effet d'augmenter le facteur de friction et le transfert thermique pour des mini-canaux.

Afin d'augmenter le rendement de la ICT, il est nécessaire de la configurer en cycle de Brayton récupéré. Pour pouvoir utiliser cette turbine dans le domaine de l'aéronautique, il faut développer un échangeur de chaleur ayant la plus petite masse possible. Pour y arriver, la méthode de fabrication la plus prometteuse est la fabrication additive métallique. La technique de fabrication la plus adaptée est la fusion sélective sur lit de poudre étant donné qu'elle permet de mieux former les mini-canaux et passages internes de l'échangeur.

CHAPITRE 3 - ARTICLE

Avant-propos

Auteurs et affiliation :

T. Parent-Simard : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

A. Landry-Blais : professionnel de recherche, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

P. K. Dubois, étudiant au doctorat, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

M. Picard, professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

V. Brailovski, professeur, École de Technologie supérieure, Département de génie mécanique

Date de soumission : 2 Novembre 2018

Publication : ASME, Turbo Expo

Numéro de manuscrit : GT2019-90978

Titre français : Effet de la rugosité de surface induit par la fabrication additive par fusion laser sélective sur lit de poudre sur un échangeur de chaleur à mini-canaux

Contribution du document :

Cet article présente les travaux qui ont été réalisés au cours de la maîtrise sur un échantillon d'échangeur de chaleur. Les résultats expérimentaux à chaud sont comparés au modèle 1D qui a été développé préalablement pour tenir en compte l'effet de la rugosité de surface. Il traite également de la fabrication de l'échantillon et des mesures géométriques de celui-ci.

Résumé français :

La Inside-Out Ceramic Turbine (ICT) est une microturbine prometteuse pour l'aéronautique. Afin d'augmenter l'efficacité et de réduire la consommation de carburant, les microturbines doivent opérer en cycle de Brayton récupéré. L'ajout d'un échangeur de chaleur (HEX) augmente la masse du moteur et peut annuler l'économie de carburant comparativement à

une turbine qui n'est pas récupérée. Pour cette raison, les requis pour un HEx qui est destiné aux turbines dans le domaine aéronautique sont : la légèreté et un arrangement compact, une haute efficacité avec faibles pertes de charge, une capacité d'opérer sous de hautes pressions et températures et un faible coût. La fusion laser sélective sur lit de poudre (LPBF) ouvre un nouvel espace de design pour des géométries qui ne peuvent pas être réalisées par des méthodes conventionnelles, mais elle induit une rugosité de surface élevée. Cet article présente les études réalisées expérimentalement et analytiquement pour un HEx à écoulements opposés contenant des mini-canaux et qui représente 1 % du débit total de la ICT. Les résultats montrent que le facteur de friction et le transfert thermique sont augmentés en régime laminaire. L'indicateur de performance qui compare un HEx avec des murs lisses et celui fabriqué par LPBF est estimé entre 1.06 et 1.13, ce qui se traduit en réduction de masse de 6 à 13 % pour les mêmes requis en termes d'efficacité et de pertes de charge. Le LPBF est une méthode de fabrication prometteuse pour des pièces de turbine à gaz, mais il est crucial de modéliser et d'incorporer les capacités de fabrication en termes de précision et de finis de surface pour augmenter le transfert thermique et réduire la masse.

Note : L'article est présentement en processus d'évaluation par les pairs.

EFFECT OF SURFACE ROUGHNESS INDUCED BY LASER POWDER BED FUSION ADDITIVE MANUFACTURING IN A MINI-CHANNEL HEAT EXCHANGER

3.1 Abstract

The Inside-Out Ceramic Turbine (ICT) is a promising microturbine for aeronautics applications. To increase the cycle efficiency and reduce fuel consumption, microturbines could operate under the recuperated Brayton cycle. The addition of a heat exchanger (HEX) increases the weight of the engine and can cancel out any fuel savings as compared to a non-recuperated turbine. For this reason, the requirements applied to HEX for aeronautic gas turbines are: low weight and volume, high effectiveness with a low pressure drop, capabilities to endure high pressure and temperature, and low cost. The Laser powder bed fusion (LPBF) opens a new design space for geometries that cannot be realized by conventional methods, but induces high surface roughness. This paper presents experimental and analytical studies of the influence of surface roughness on the performances of a 3D-printed, counterflow, mini-channel HEX, with 1% of the total mass flow rate of the ICT. Results showed that the friction and heat transfer are increased in the laminar regime. The performance indicator comparing a smooth and LPBF HEX is estimated between 1.06 and 1.13, which translates into a 6-13 % mass reduction for the same pressure drop and effectiveness. LPBF is a promising method to manufacture gas turbine parts, but it is crucial to model and incorporate its manufacturing capacities in terms of precision and surface finish to enhance HEX heat transfer and reduce mass.

3.2 Introduction

Sub-megawatt gas turbines, or microturbines, offer an attractive alternative to diesel engines for small power generation applications thanks to their high efficiency potential, low emissions, multi-fuel capability, small package size and low maintenance costs, as well as their high exhaust temperatures suitable for combined heat and power (CHP) systems [28, 29]. Microturbines offer better results in terms of emissions, noise, vibrations and power to weight ratio compared to diesel engines, but have poor specific fuel consumption [1]. To counteract this, a heat recuperator can be added to the Brayton cycle [30]. This, however, comes with two compromises: (i) the cycle is dependent mostly on turbine inlet temperature (TIT), meaning high temperatures

must be achieved at small rotor scales, and (ii) the addition of a heat exchanger (HEX) dramatically reduces power to weight ratio.

Achievable TIT is dictated by the material of the rotor, and cooled superalloys are costly and pushed to their limits. To increase TIT, ceramic rotors have been developed, but were proven unreliable and unsuitable for gas turbines. Current development of the Inside-Out Ceramic Turbine (ICT), a novel type of turbine wheel, could be a major enabler to the use of ceramic blades. The ICT's blades are held in compression between a flexible hub element and a composite rim. As ceramics are markedly more resistant in compression than in tension, this configuration can achieve higher rotational speeds than conventional ceramic turbine wheels. The ICT rotating assembly is presented in Figure 3.1. Development of an ICT rotor is presented in Refs. [2-4].

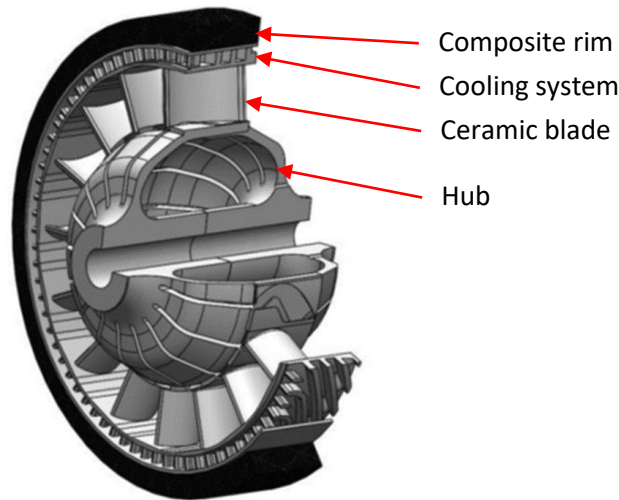


Figure 3.1 – Inside-out ceramic turbine (ICT) rotating assembly [4]

A ceramic recuperator would be required to achieve a TIT of 1800 K to reach the maximum ICT efficiency of 50%. However, previous work has shown the difficulty of using ceramics in recuperators that will need to be overcome in the long term. The main concern is cracking that may occur during fabrication or operation of the HEX [6-9].

In the short to medium terms, the TIT target for the ICT is 1550 K, which leads to an efficiency between 40 to 45% depending on targeted power density [10]. This lower TIT leads to a TOT of 1055 K, which can be achieved with a metallic HEX that offers adequate mechanical properties and oxidation resistance. As an example, CGT302 – a 300 kW ceramic microturbine program –

has reached over 42 % cycle efficiency with a configuration that uses a ceramic turbine wheel and metallic HEx [31], demonstrating that this configuration has real-world potential.

Recuperators are currently used in land-based equipment, and some heavy-duty mobile applications, but have not been adapted to aeronautics so far. This is due to the weight of the recuperator, which is typically not viable for aircrafts. An increase in total weight of the engine and extra fuel requirement to carry it can cancel out any fuel savings compared to a non-recuperated turbine [11]. The addition of a recuperator must therefore provide a sizeable cycle efficiency gain. For this reason, the requirements applied to HEx for aeronautic gas turbines are: low weight and volume, high effectiveness with a low pressure drop, capabilities to endure high pressure and temperature, and low cost [11]. These requirements are antagonistic and, therefore, the designer must be inventive and use atypical geometries and manufacturing processes to achieve a good balance of performance and compactness. One of the best configurations to achieve this is a counterflow plate HEx [32].

Typical manufacturing of a plate-type HEx uses brazing or diffusing bonding of a stack of 2D cut metal plates, which is complicated, time consuming and costly [20]. Furthermore, these methods inherently limit the final geometry, thus restraining the design space for a compact, high-efficiency HEx. Besides, these methods are not prototype-friendly and more suited for large-scale HEx production. Laser powder bed fusion (LPBF) additive manufacturing (AM) is an interesting alternative manufacturing method to build small-scale heat exchangers. LPBF opens a new design space for geometries that cannot be realized by conventional methods, while still offering materials with good properties at the targeted TOT. In 2017, a HiETA-Renishaw partnership released a case study in which a 3D-printed microturbine recuperator is claimed to be approximately 30% lighter and smaller than an equivalent HEx made by conventional methods, while maintaining the requirements in terms of pressure drop and heat transfer⁶.

However, LPBF parts have a relatively high surface roughness, and this inherent limitation has a fundamental impact on HEx performances. Stimpson et al. have studied the effect of AM-induced surface roughness and concluded that it increases the friction factor and heat transfer, depending on the relative roughness ratio ϵ/Dh [27]. Equations 3.1 and 3.2 introduce the thermal performance

⁶ <http://resources.renishaw.com/en/download/case-study-exchanging-metal-3d-printing-solutions-with-hieta-93510>

indicator P , which compares a 3D-printed HEX with high surface roughness, to a smooth-wall HEX that can be manufactured by conventional processes, where f is the Darcy friction factor.

$$P = (\text{Nu}/\text{Nu}_0)/(f/f_0)^{1/3} \quad (3.1)$$

where,
$$\text{Nu} = \frac{hD_h}{k} \quad (3.2)$$

A performance indicator P greater than 1 means that the heat transfer is enhance enough to compensate for friction factor augmentation. If the heat transfer increase more than the friction factor, it is possible to design a lighter HEX with the same heat transfer and pressure drop as a smooth-wall by shortening the channels. In the case that the performance indicator P is less than 1, the rough-surface HEX penalty in pressure drop will outweigh its gain in heat transfer, which will make it heavier than a smooth-wall HEX. In the case when the performance indicator P is equal to 1, the process does not have an incident on the performance of the product.

This paper focuses on the design and experimental validation of a metallic additively manufactured mini-channel (5 mm x 0.4 mm) HEX sample, as a stepping-stone to the development of more complex HEX geometries. To consider the effect of friction factor and heat transfer increase, a 1D model was used to simulate the HEX core [10]. The model allows to predict the thermal efficiency of the HEX in laminar flow for rough channels. A sample was designed to operate at 1.5 g/s, which is roughly 1 % of the ICT mass flow rate. The sample was printed on an M280 LPBF system (EOS Germany) using cobalt-chrome alloy (EOS CoCr MP1⁷) and is shown in Fig. 3.2.

⁷http://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/4b839242298b3d77/21463526ca053889c9784ec989f3c88/EOS_CobaltChrome_MP1_en.pdf

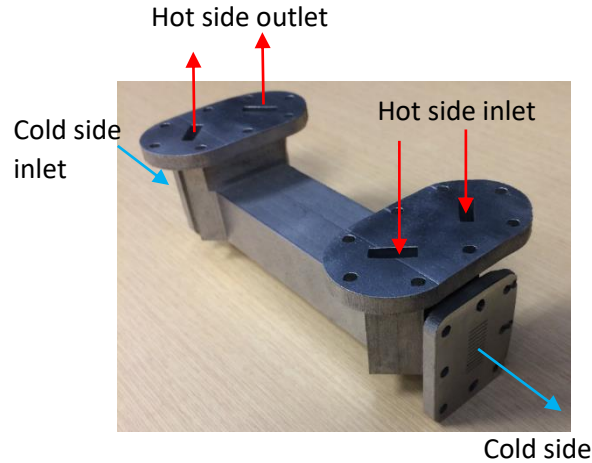


Figure 3.2 – CoCr sample heat exchanger fabricated by laser powder bed fusion

The geometrical analysis showed that there are variations in channel and plate dimensions resulting in hydraulic diameters that are smaller than nominal. A comparison of the model predictions with the experimental measurements showed that the model adequately predicts the performance of a rough-wall HEx in terms of efficiency and pressure drop. Tests under combustion environment showed that it is possible to operate the sample at high temperature without oxidation concerns.

3.3 Geometry and 3D printing

The selected material for the prototype is EOS CoCr MP1. This material meets the chemical and mechanical specifications of ISO 5832-4 and ASTM F75, or Alloy 1. The printing parameters were MP1-050-103-Speed, which is an EOS CoCr specification with a layer thickness of 50 μm . After printing, the prototype was stress-relieved for 6 hours at 1423 K under an argon atmosphere. Since this material is mainly used in orthopedic and dental implants, there is little information about its properties at elevated temperatures. However, EOS claims that this material can be operated up to 1423 K and has good mechanical properties at temperatures between 773 K and 1273 K with good corrosion resistance. Shen and Mu evaluated the oxidation resistance of a cast CoCr alloy ingot that was oxidized at 1223 K for 50 hours and obtained a mass change result near 0.65 mg/cm^2 [33]. Sun et al. evaluated creep resistance at high temperature of CoCrMo components additive manufactured by electron beam melting. The results predict that it is possible to reach a lifetime of 200 hours at 973 K under 240 MPa of stress [34]. Based on these observations, CoCr alloy was considered suitable for the application, since a full-scale ICT HEx prototype is

intended to operate for 100 hours under 20 MPa of stress in a range of temperatures of 1023-1123 K.

The counterflow HEx was built by orienting the plates vertically to obtain the best surface finish and to avoid internal supports, since the overhang in the channels is less than 1 mm. It is presented in Fig. 3.3.

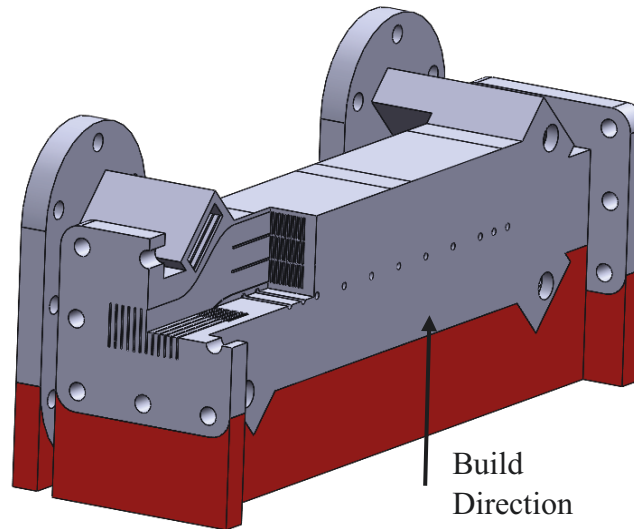


Figure 3.3 – Cut view of the HEx with supported region (red) and build direction

The internal view of the heat exchanger with channel specifications is presented in Fig. 3.4.

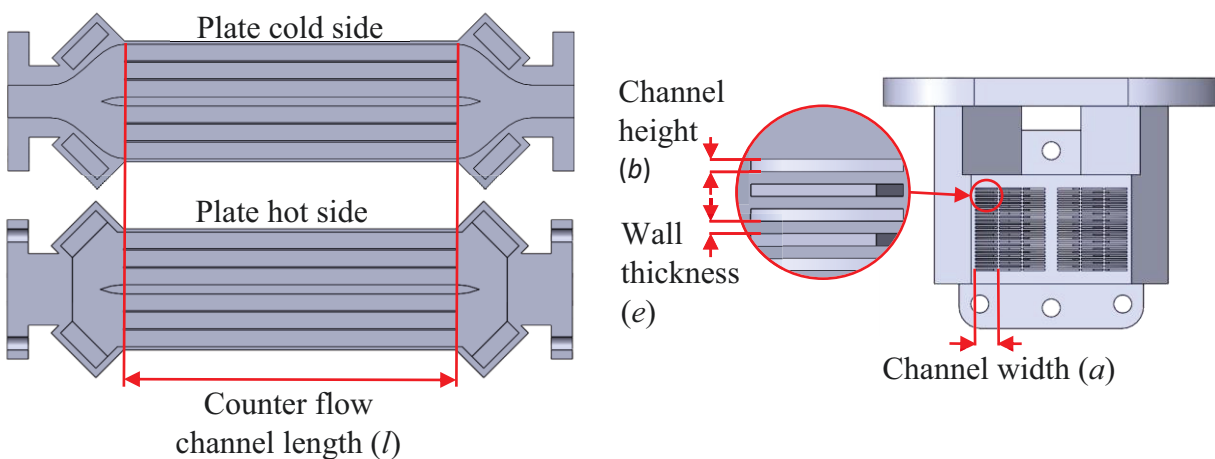


Figure 3.4 – Internal view of cold and hot sides plates with channels specifications

The plate shape was designed to combine the manifold and the HEx in a single part. Two HEx were built, the first for testing and the second for destructive dimensional analysis. The analysis of the cut part revealed that all the powder was removed before the stress relief, and no clogged channels were found. However the channels were not perfectly aligned. Although the HEx was slightly bent, the channels kept their structural integrity. The core was cut in slices to be analyzed by microscope to obtain the as-stress-relieved channel dimensions. Table 3.1 shows the comparison between the geometric parameter of the designed HEx and those measured on the printed part.

Table 3.1 - Specifications of the channels

Parameter	Nominal	Measured
Number of channels on each side	72	
Couterflow exchange length l (mm)	100	-
Channel Width a (mm)	5.0	4.9
Wall Thickness e (mm)	0.4	0.5
Channel Height b (mm)	0.4	0.3
Hydraulic Diameter D_h (μm)	741	565
R_a (μm)	-	6.4
R_z (μm)	-	28.0

Although the difference in dimensions between the designed and printed part is significant, it remains within the process tolerances which are ± 0.05 -0.2 mm for this particular EOS parameter set. Several measurements taken with a microscope and the wall irregularities induced by LPBF are shown in Fig. 3.5.

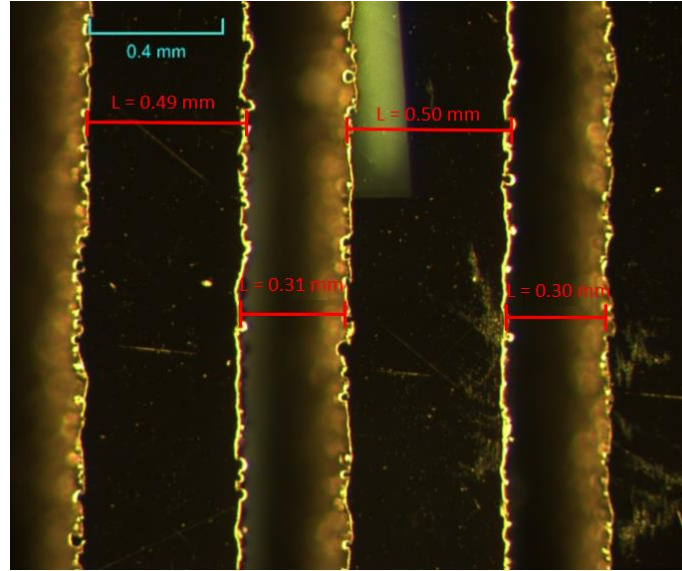


Figure 3.5 – Microscopic measurements of channels (~0.3 mm) and walls (~0.5 mm) of the LPBF heat exchanger for a 63 x scale

The as-built surface roughness (see Table 3.1) is lower than that specified by the EOS material spec sheet that suggests an R_a of 8 to 12 μm and R_z of 38 to 50 μm . The experimental roughness was measured with a Dektak 150 surface profiler. The roughness was evaluated in internal channels of the cu part, in the same direction of the flow.

3.4 Analytical development

Stimpson et al. [27] studied the effect of the surface roughness induced by LPBF on the pressure drop and heat transfer of mini-channels. In their study, rectangular CoCr and Inconel 718 coupons made by LPBF were compared to a 6061 circular aluminum coupon made by conventional machining. For the LPBF coupons, they found that even if the flow was theoretically in the laminar region, the friction factor was higher than predicted by the standard laminar theory due to their surface roughness. The Fig. 3.6 presents the results of the study that compares the experimental results for different relative roughness (ϵ/Dh). On the graph, it is possible to observe that the friction factor goes higher when the relative roughness increases even if the flow is laminar.

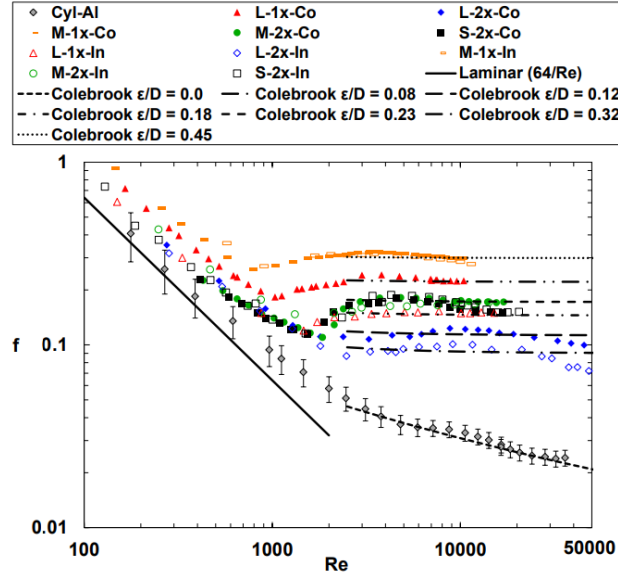


Figure 3.6 – Friction factor of rectangular channel DMLS [27]

The relative roughness was determined graphically with comparison to Colebrook relations for turbulent flow. The L-2x-In coupon is about $\epsilon/Dh = 0.08$, while L-2x-Co is about $\epsilon/Dh = 0.12$. The M-2x-In, M-2x-Co and L-1x-In coupons are about $\epsilon/Dh = 0.20$. For the M-1x-Co and M-1x-In they are about $\epsilon/Dh = 0.45$. The remaining coupon, the L-1x-Co is suspected of having manufacturing abnormalities, as it should have been in the $\epsilon/Dh = 0.20$ group due to his roughness and hydraulic diameter [27]. It is necessary to consider this effect in rough wall mini-channels as the pressure drop will be greater than in a smooth mini-channel that has the same dimensions. Stimpson also studied the effect of the roughness on heat transfer. The results are shown in Fig. 3.7.

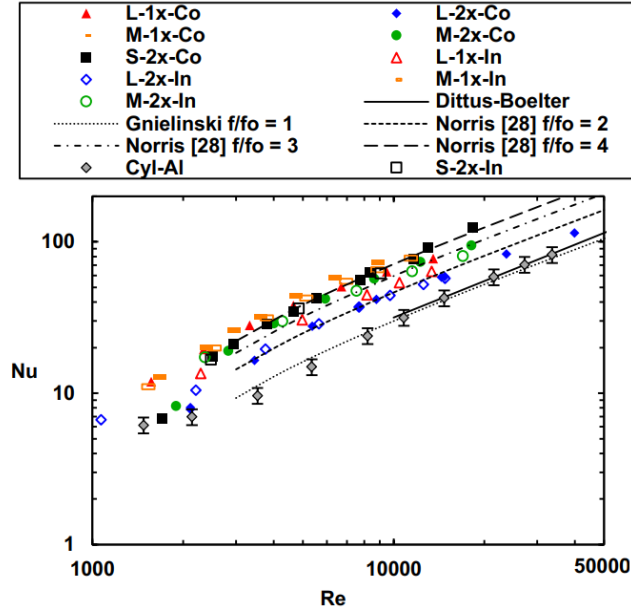


Figure 3.7 – Nusselt number of rectangular channel DMLS coupons [27]

On the graph, the results are compared to Norris theory for angled grove channels [35]. The results show that the experimental data can be predicted by the same relation as Norris found for turbulent flow in rough tubes, which is presented Eqs. 3.3 and 3.4 [35].

$$\left(\frac{Nu}{Nu_0}\right) = \left(\frac{f}{f_0}\right)^n \quad (3.3)$$

where:

$$n = 0.68(Pr)^{0.215} \quad (3.4)$$

It was reported that this correlation is valid for a friction factor increase of less than 4. Stimpson also compared the increase of friction factor to the heat transfer increase. The results are presented in the Fig 3.8. Nu , f corresponds to a rough walls sample, hence Nu_0 and f_0 would be the results of the same sample with smooth walls.

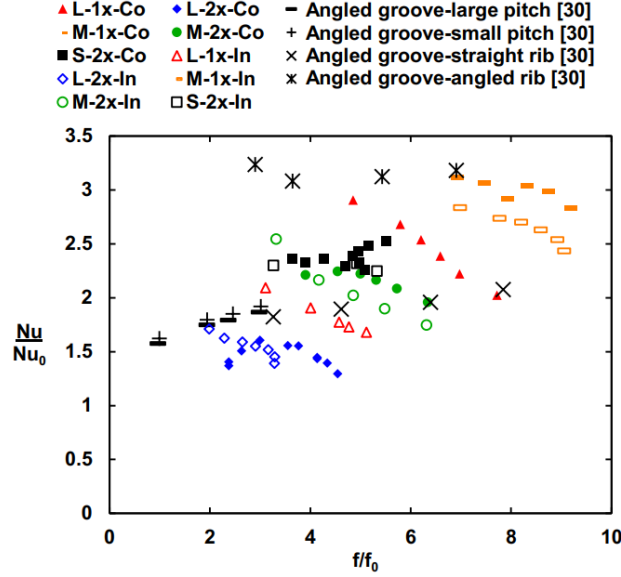


Figure 3.8 – Heat transfer augmentation versus friction factor augmentation of rectangular channel DMLS coupons [27]

On the graph there are many points for the same sample, as many tests were performed for different Reynolds numbers. The author did not report what these numbers were. The graph shows a general trade-off between heat transfer augmentation versus pressure drop increase.

A finite elements (FE) 1D model was developed by Landry-Bais and Picard to predict the performance of a counterflow heat exchanger [10]. This model was used and adapted to the printed HEx project. The inputs to the model are the channel width (a), the channel height on both hot (b_{GS}) and cold (b_{AS}) sides, the wall thickness, the counterflow section length (L), the mass flow rate (\dot{m}), the inlet flow temperature (T), and the surface roughness (ϵ) of the walls. This model allows running a design of experiments (DOE) routine to find the lightest design in function of the calculated pressure drop, efficiency and stress. The model is generalized to a HEx with straight counterflow rectangular channels and is presented in the Fig. 3.9.

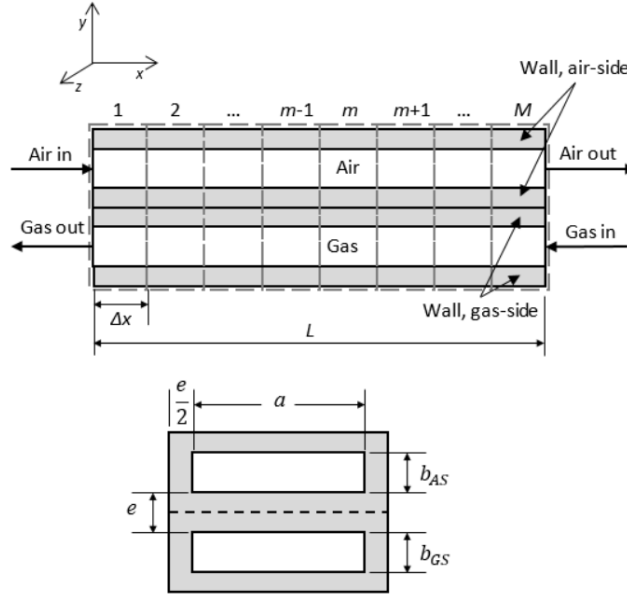


Figure 3.9 – Heat Exchanger 1D Model description [10]

The model solves energy conservation equations for fluid and solid cells. Energy is transferred to the solid cells by two sources. The first is the convection of the fluid and the second is conduction through neighbouring cells. In the case of the fluid cells, they receive energy from the walls by convection and mass-transport from the neighbouring cells. Axial conduction was added to the model to consider the heat transfer that has a negative impact on the thermal effectiveness of the HEx. The model takes in consideration the variation of the flow speed due to temperature variation through the exchanger and the properties in each cell. The prediction of the pressure drop and the thermal effectiveness is more accurate than Standard Number of Transfer Units (NTU) methods, which are widely used. In the 1D FE model, the flow is assumed to be laminar and the pressure drop (ΔP) is evaluated using Poiseuille's flow equation presented in Eq. 3.5.

$$\Delta P = f \frac{\Delta x}{D_h} \frac{\rho V^2}{2} \quad (3.5)$$

To have a better estimation of the pressure drop of a rough wall mini-channels HEx, the friction factor curves in Stimson's study were implemented in the 1D FE model. The model makes a 2D linear interpolation in function of the Reynold Number and the relative roughness to estimate f . Figure 3.10 illustrates the comparison between the correlation for a laminar flow between parallel

plates ($f_0 = 96/Re$) and the linear interpolation for a relative roughness of $\epsilon/Dh = 0.32$ based on Stimpson's study.

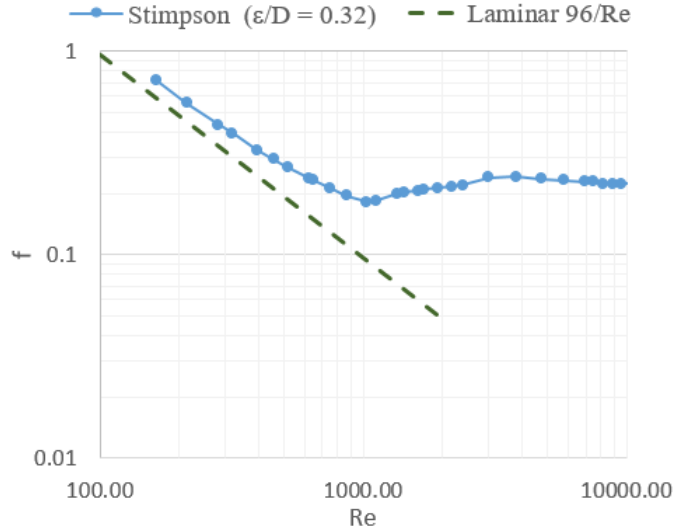


Figure 3.10 – Comparison of friction factor for parallel plates laminar flow and correlation used for a relative roughness of $\epsilon/Dh = 0.32$ based on Stimpson's study

Once the friction factor is determined, it is compared to f_0 . The Nusselt number Nu_0 is determined using fully laminar flow in tubes [36]. 3.3 and 3.4 correlations are used to find Nu to consider the effect of heat transfer increase due to high relative roughness. These two correlations were proven on a turbulent experiment, but they are used throughout laminar and transitional regimes in the FE model.

By combining the relation between the actual Nusselt number and the actual friction factor (Eqs. 3.3 and 3.4, assuming $Pr = 0.7$ for air) with the definition of the performance factor (Eq. 3.1), one can derive a relation of the performance factor that depends solely on the ratio between the actual friction factor considering roughness to the theoretical friction factor with smooth walls as shown in Eq. 3.6.

$$P = \left(\frac{f}{f_0} \right)^{0.3} \quad (3.6)$$

This simple relation means that the performance factor, or the potential to reduce weight of the heat exchanger, will increase monotonically with increasing friction factor, as long as the friction factor ratio remains under 4 and the correlation in Eq. 3.3 remains valid.

For the Reynolds numbers in the heat exchanger with nominal mass flow, ranging from 168 to 337, the performance indicator P is estimated to be from 1.06 to 1.13. This means that by redesigning the geometry of the HEx, the mass of the core could be reduced by 6 to 13% while keeping the effectiveness and pressure drop constant.

3.5 Analytical Results

The 1D FE model was used to evaluate the influence of the process-induced geometrical deviations on the performance of the HEx. For the true channel dimensions, the relative roughness was estimated to be $\epsilon/Dh = 0.32$, based on Stimpson's study for channels with the same material and similar hydraulic diameter and average roughness R_a [27]. The nominal dimensions were greater, resulting in a theoretical roughness of $\epsilon/Dh = 0.25$, as the surface roughness does not change while hydraulic diameter increases. Figure 3.11 presents the difference between the predicted pressure drops and efficiencies for both dimensions.

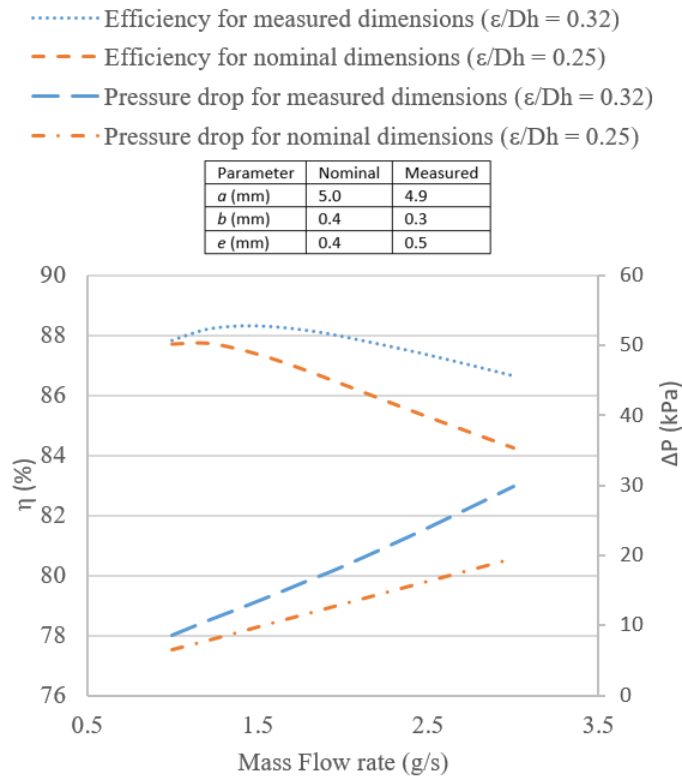


Figure 3.11 – Comparison of the pressure drop and efficiency predictions for true channel dimensions versus as-designed

The pressure drop is 30 to 40 % higher for the as LPBF dimensions. The effectiveness is 0 to 3% higher for the true dimensions. Even if the process tolerances are in ± 0.1 mm, they have a major contribution on HEx performances.

3.6 Experimental validation: Results with air

To validate the effects of high temperature only, the HEx test sample was tested with heated air at first. A diagram of the test rig used to evaluate the efficiency and pressure drop of the HEx with air is presented in Fig. 3.12.

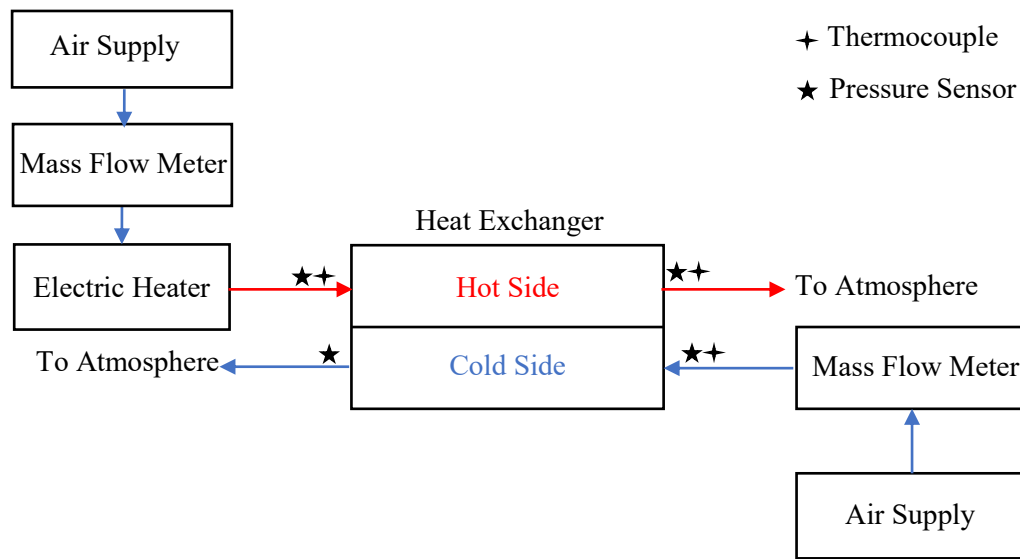


Figure 3.12 – Test bench to evaluate the efficiency and pressure drop of the HEx with hot air

On both sides, room temperature air flow is injected with a mass flow meter. An electric air heater was installed between the mass flow meter and the HEx hot side inlet. The flows temperatures were taken at inlets and outlets of the HEx with K type thermocouples. On the hot side, the pressure drop was measured with a differential pressure sensor because the HEx has manifolds. On the cold side, the pressure was taken at the inlet and compared to the atmospheric pressure to evaluate the pressure drop, as there are no manifolds. By using only air, combustion products are avoided, therefore properties of the fluid are well known at different temperatures. During tests, the test rig was wrapped in insulating alumina fiber to minimize heat transfer to the environment. By applying an energy balance between the cold and hot flow, it is possible to evaluate the quantity of heat loss to the environment. Equation 3.7 gives the heat power emitted by the hot fluid and Eq. 3.8 gives

the heat power absorbed by the cold fluid. Equation 3.9 evaluates the percentage of heat loss to the environment.

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_h C_{p_h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (3.7)$$

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c C_{p_c} (T_{c,i} - T_{c,o}) \quad (3.8)$$

$$Heat\ Loss = 1 - \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_h} \quad (3.9)$$

The test rig is used to measure the performance of the HEX in terms of pressure drop and heat transfer efficiency. The pressure drop is measured at the hot side between the inlet and outlet manifolds. The effectiveness is computed with the temperatures of the flows of both sides. For a perfectly insulated HEX without any loss to the environment, the effectiveness of the hot fluid is equal to the cold fluid as shown in Eqs. 3.10-3.12.

$$\eta = \frac{C_h(T_{h,i} - T_{h,o})}{C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i})} = \frac{C_c(T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (3.10)$$

where, $C = \dot{m}c_p$ (3.11)

and $C_{min} = \min(\dot{m}_h c_{p_h}, \dot{m}_c c_{p_c})$ (3.12)

The experimental values of the HEX are presented in Table 3.2.

Table 3.2 – Experimental results of the HEX for various air mass flow rates

Mass flow rate (g/s) (same for cold and hot sides)	Inlet Temperature Hot Side (K)	Outlet Temperature Hot Side (K)	Inlet Temperature Cold Side (K)	Outlet Temperature Cold Side (K)	Efficiency (%)	Pressure Drop Hot Side (kPa)	Pressure Drop Cold Side (kPa)
1.00 ± 0.03	870 ± 16	369 ± 3	293	812 ± 10	89 ± 3	8.5 ± 0.3	18.4 ± 0.3
1.20 ± 0.03	875 ± 14	376 ± 2	294	820 ± 10	89 ± 3	10.5 ± 0.3	22.8 ± 0.4
1.40 ± 0.05	878 ± 14	379 ± 2	294	825 ± 9	89 ± 3	12.4 ± 0.3	27.5 ± 0.4
1.60 ± 0.06	878 ± 13	382 ± 2	294	827 ± 9	89 ± 3	14.1 ± 0.4	32.1 ± 0.4
1.80 ± 0.07	878 ± 13	384 ± 3	294	826 ± 9	89 ± 3	16.0 ± 0.4	37.1 ± 0.4
2.00 ± 0.08	877 ± 13	387 ± 3	294	824 ± 9	88 ± 4	17.8 ± 0.4	42.2 ± 0.4
2.5 ± 0.1	872 ± 13	391 ± 5	294	814 ± 9	87 ± 5	22.1 ± 0.4	55.5 ± 0.5
3.0 ± 0.1	867 ± 13	396 ± 6	294	802 ± 9	86 ± 4	26.3 ± 0.5	69.8 ± 0.5

The pressure drop is higher on the cold side, as there is an expansion after the HEX inlet and a contraction before the outlet. The heat loss was estimated between 5 and 7% for every test. Therefore, the predicted pressure drops were compared to the hot side experimental results in Fig. 3.13.

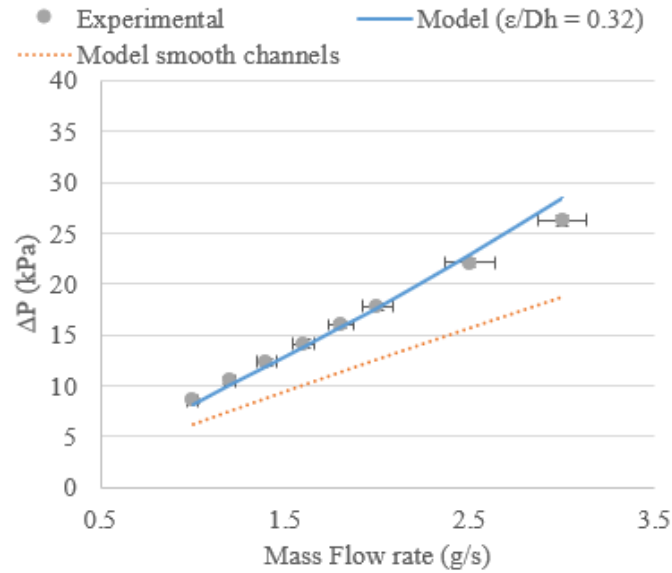


Figure 3.13 – Comparison between the 1D model and the experiments for the pressure drop on the hot side of the HEX.

The relative roughness used to predict the performance of the HEX is $\epsilon/D_h = 0.32$. The 1D model predictions are close to the experimental data for the pressure drop for the lowest mass flow rate.

The efficiency comparison between the 1D model predictions and experimental results are shown in Fig. 3.14.

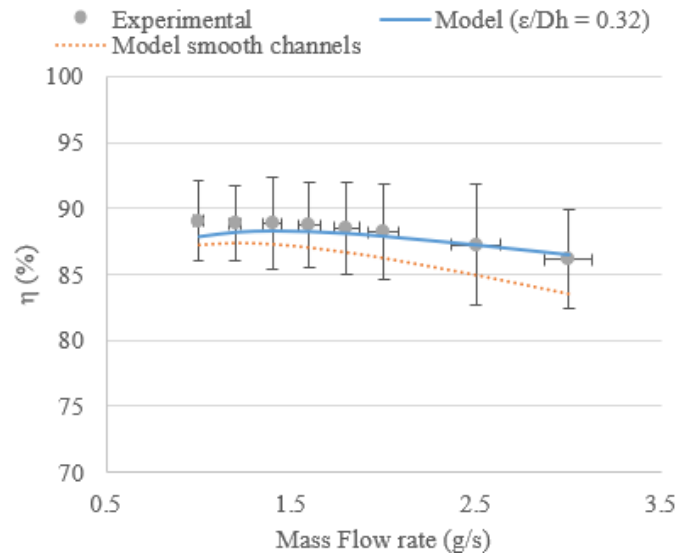


Figure 3.14 – Comparison between the 1D model and the experiments for the efficiency of the HEX

The results show that the efficiency is well predicted by the model even if the correlation used for the heat transfer augmentation is normally used for turbulent flows.

3.7 Experimental validation: Combustion

In a turbine application, the HEX operates with air on the cold side and combustion products on the hot side. To simulate this environment, the test bench presented in Fig. 3.15 was designed.

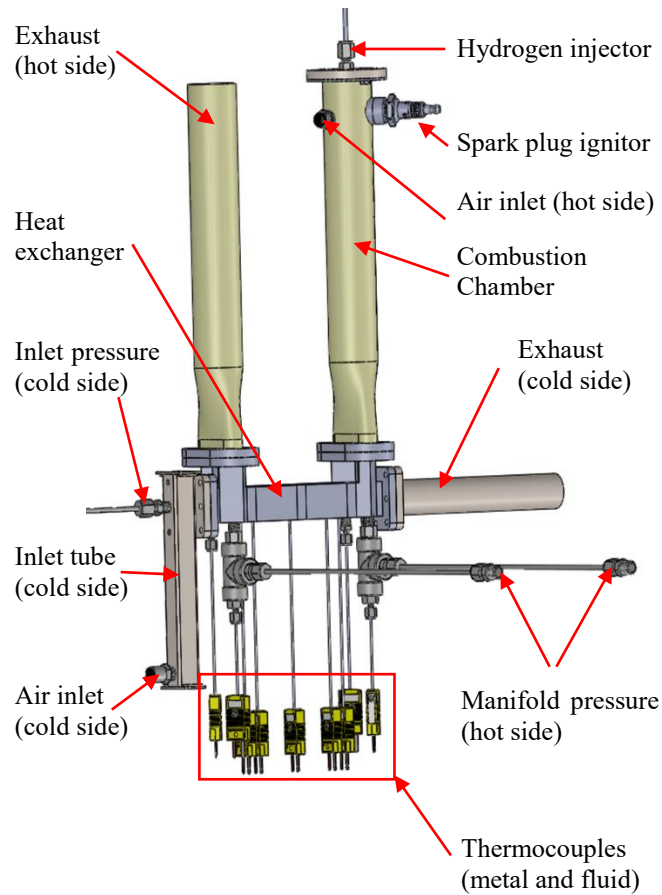


Figure 3.15 - Test bench to simulate operations conditions of the ICT turbine on the sample LPBF HEx.

The HEx was tested in simulated conditions to match the ICT temperature requirements. A small hydrogen combustion chamber was coupled to the hot side. On the cold side, ambient air was injected at the same mass flow rate as on the hot side. The heat exchanger was tested at different mass flow rates: 1.00, 1.65 and 2.00 g/s (0.6-1.3 % of the ICT mass flow rate) over a wide range of inlet temperatures (from 296 K to 1123 K). Two tests were taken up to 1 hour with a mass flow rate of 1.65 g/s on both sides. The first was chosen for the analysis, as it does not require a destruction of the HEx to analyze degradation. The temperature reached in this region for the second test was 946 K. The comparison did not show any dimensional variation after testing at high temperature. A leak test and visual inspection was proceeded after each test to evaluate that thermal stresses did not induce cracking or leaks between plates or to the environment. The analysis did not show any integrity or oxidation problems.

3.8 Conclusions

AM is a promising method to manufacture gas turbine parts such as lightweight heat exchangers. LPBF opens a new design space for geometries that cannot be realized by conventional methods to enhance heat transfer. However, the process induces a high surface roughness that increases friction and heat transfer for parts with small hydraulic diameters. This influence can be determined to be an advantage, or a disadvantage compared to other manufacturing methods by the performance indicator P . In the presented heat exchanger, the performance indicator is between 1.06 and 1.13, which indicates that the LPBF should provide a slight benefit on the performance of the HEx. The mass could be reduced from 6 to 13% for the same pressure drop and effectiveness by redesigning the HEx with LPBF in mind.

A functional HEx sample was built on a scale of 1 % of the mass flow rate of the full-scale ICT HEx, with fully integrated manifolds. The tolerances of the process are about ± 0.1 mm. This had the effect of reducing the mini-channels hydraulic diameter and increase the pressure drop up to 40% for a 3 pts gain in efficiency. Thus, for small parts or channels, it is recommended to adjust LPBF parameters to tighten the process tolerances in cases such as this, where important deviations in dimensions severely affect the performance of the design.

A 1D FE model was used to design a lightweight HEx and evaluate its performances in terms of pressure drop and efficiency. The model predictions of pressure drop and efficiency are close to the experimental results.

LPBF offers several materials that can be operated under high temperature. It was possible to operate a CoCr part in a hydrogen combustion environment up to 1123 K for 1 hour without failure or any apparent oxidation problems.

The key to take full advantage of AM in gas turbine designs is to correctly understand and model its capacities and the effects of dimensional tolerances and surface roughness, in order to explore atypical HEx geometries that will enable significant gains in heat transfer and mass reduction.

3.9 Nomenclature

a	Channel width
AGATA	Advanced Gas Turbine for Automobiles
AM	Additive Manufacturing
b	Channel height
c_p	Specific heat
CHP	Combined Heat and Power
D_h	Hydraulic diameter
DOE	Design of experiments
f	Darcy friction factor for a rough wall printed HEx
f_0	Darcy friction factor for a smooth wall
FE	Finite elements
h	Heat transfer coefficient
HEx	Heat exchanger
ICT	Inside-Out Ceramic turbine
k	Thermal conductivity
l	Counter flow channel length
LPBF	Laser powder bed fusion
\dot{m}	Mass flow rate
Nu	Nusselt number for a rough wall printed HEx
Nu_0	Nusselt number for a smooth wall
P	Performance indicator of the HEx
\dot{Q}	Heat transfer rate
R_a	Average roughness
Re	Reynolds number
R_z	Peak to peak roughness
T	Temperature
TIT	Turbine Inlet Temperature
TOT	Turbine Outlet Temperature
Δp	Pressure drop
Δx	1D FE model cells length
ϵ	Sand grain roughness
η	Effectiveness
ρ	Air density

Subscripts

c	Cold fluid
h	Hot fluid
i	Inlet
o	Outlet

3.10 Acknowledgments

The authors would like to thank Université de Sherbrooke for the support provided by the research professionals and professors involved in the development of the ICT. Thanks go out to LAMSI at École de technologie supérieure (ÉTS) for their assistance and for supplying the equipment required for additive manufacturing. Thanks to Exonetik Turbo, NSERC, Rio Tinto and Hydro-Québec for their contribution in the funding of the project. Also, a special thanks to Morgan Letenneur for his help with the LPBF manufacturing process.

CHAPITRE 4 – CONCLUSION

Afin d'augmenter l'efficacité et de réduire la consommation de carburant des microturbines à gaz, il est nécessaire de les configurer en cycle de Brayton récupéré en ajoutant un échangeur de chaleur. L'ajout d'un échangeur de chaleur augmente la masse de la turbomachine. Pour des applications mobiles telles que l'aéronautique, cette approche n'est pas utilisée puisque le surplus de masse nécessite plus de carburant pour le transporter et pourrait annuler le gain sur l'efficacité. Les échangeurs de chaleur doivent être légers, peu volumineux, fiables et capables d'opérer à de hautes pressions et températures pour être utilisés dans ce secteur d'activité.

Le développement d'un échangeur de chaleur par fusion laser sélective sur lit de poudre a permis de démontrer qu'il s'agit d'une méthode intéressante pour fabriquer cette pièce :

- Il a été possible d'imprimer un échangeur de chaleur qui représente 1 % du débit total de la turbine ICT. Les collecteurs et le cœur de l'échangeur de chaleur ont été imprimés en une seule pièce. Les analyses par microscope et par découpe ont révélé que les canaux imprimés ne sont pas obstrués et fonctionnels. Cependant, les dimensions sont différentes de celles dessinées en raison des tolérances du procédé.
- Un modèle 1D a été utilisé pour prédire les performances de l'échangeur en tenant compte de la rugosité de surface. Celui-ci pourra être réutilisé pour des travaux futurs afin de trouver la géométrie optimale pour l'échangeur de la ICT en fonction de ses requis.
- Les essais avec de l'air chaud ont permis de valider que le modèle prédit bien les performances réelles. Pour que le modèle soit représentatif, il est important de bien isoler l'échangeur de chaleur pour éviter les pertes vers l'environnement.
- Les essais à haute température sous un environnement de combustion ont permis de valider que le matériau choisi, le CoCr, est suffisamment résistant à l'oxydation pour permettre de réaliser un prototype qui sera installé sur la turbine.
- L'estimation du facteur de performance P a révélé qu'il serait possible de réduire la masse de l'échangeur de 6 à 13 % pour la configuration actuelle. La masse pourrait être réduite

davantage en effectuant le design de nouvelles géométries qui augmentent le transfert thermique et qui peuvent seulement être réalisées par la fabrication additive.

La fusion laser sélective sur lit de poudre pose également des défis et problématiques à adresser avant de pouvoir produire un échangeur de chaleur complet pour une microturbine :

- Les tolérances de fabrication de ce procédé doivent être mieux contrôlée dans le cas de petits passages tels que les mini-canaux. La répétabilité des pièces n'est également pas assurée. Il faudrait faire plusieurs essais avec de petites pièces afin de vérifier si on peut améliorer les tolérances en changeant les paramètres de la machine ou encore en modifiant la géométrie dans le fichier utilisé pour la fabrication.
- La fabrication d'un échangeur de chaleur complet nécessite un espace de fabrication volumineux. Comme les espaces de fabrication de ces machines sont petits, il faut être en mesure de fabriquer plusieurs modules et de les assembler par la suite, ce qui peut rapidement complexifier la fabrication.
- Le temps de fabrication pour cette méthode est élevé, ce qui fait en sorte que la méthode se prête mal lorsque l'on veut faire une production de masse de mêmes pièces.
- Le prix de fabrication est également plus élevé que les méthodes de fabrication conventionnelle.

Ce travail a permis de développer les outils et connaissances nécessaires pour les travaux futurs. Avant de fabriquer un échangeur de chaleur complet pour la ICT, il faut déterminer le nombre de canaux ainsi que leurs dimensions à l'aide du modèle d'éléments finis 1D pour rencontrer les requis de la turbine. Ensuite, il faut effectuer des essais de fabrication et trouver les paramètres qui permettent d'obtenir les dimensions désirées. Par la suite, il faut trouver une manière d'assembler l'échangeur en modules et l'implémenter sur la ICT. Une fois ces défis relevés, il sera possible d'opérer la ICT en cycle de Brayton récupéré.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] Kobayashi, Y., Matsuo, E., Inagaki, T. and Ozawa, T. “Hot-Gas Spin Testing of Ceramic Radial Turbine rotor at TIT 1400 C”, *SAE Transactions 1991*, Vol. 100 No. 5 (1991). pp. 453-458.
- [2] Landry, C., Picard, B., Parent-Simard, T., Plante, J.-S. and Picard, M. “Rotordynamics Experimental Validation of Sliding-Blade Architecture for an Inside-Out Ceramic Turbine”, *ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 7A (2018). V07AT33A024. DOI 10.1115/GT2018-76698.
- [3] Courtois, N., Ebacher, F., Dubois, P.K., Kochrad, N., Landry, C., Charrette, M., Landry-Blais, A., Fréchette, L.G., Plante, J.-S., and Picard, M. “Superalloy Cooling System for the Composite Rim of an Inside-Out Ceramic Turbine”, *ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air*, Vol. 8 (2017). V008T26A014. DOI 10.1115/GT2017-64007.
- [4] Landry, C., Dubois, P. K., Courtois, N., Charron, F., Picard, M., and Plante, J.-S., “Development of an Inside-Out Ceramic Turbine”, *ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 8 (2016). V008T23A022. DOI 10.1115/GT2016-57041.
- [5] Rodgers, C. “Microturbine Cycle Options”, *ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 1 (2001). DOI 10.1115/2001-GT-0552.
- [6] Vick, M. Young, T., Kelly, M., Tuttle, S., Hinnant, K. “A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design, Concept, Cycle Analysis, and Recuperator Component Prototype Tests”, *ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air*, Vol. 8 (2016). DOI 10.1115/GT2016-57780.
- [7] Gabrielsson, R., Lundberg R., and Avian, P., “Status of the European Gas Turbine Program – AGATA”, *ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 2 (1998). DOI 10.1115/98-GT-392.
- [8] Gabrielsson, R. and Holmqvist, G., “Progress on the European Gas Turbine Program “AGATA””, *ASME. J. Eng. Gas Turbines Power*. (1998). DOI 10.1115/1.2818072.
- [9] Vick, M. J., "High efficiency recuperated ceramic gas turbine engines for small unmanned air vehicle propulsion" (2012), PhD thesis, Imperial College, London, London, UK.

- [10] Picard, B., L.-Blais, A. Picard, M. and Rancourt, D. “Power-Density to Efficiency Trade-Off of a Recuperated Inside-Out-Ceramic Turbine (ICT)”, *ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air* (2019)
- [11] Min, J. K., Jeong J.H., Ha, M. Y. and Kim, K.S. “High temperature heat exchanger studies for applications to gas turbines”, *Heat and mass transfer*, 46(2) (2009). pp. 175.
- [12] Sunden, B. “High temperature heat exchangers (HTHE)”, *Proceedings of the 5th International Conference on Science, Engineering and Technology*, (2005). CHE2005-29, pp. 226-238.
- [13] Saha, S.K., Tiwari, M. Sundén. B. and Wu, Z. “Advances in heat transfer enhancement”, *Springer International Publishing*, (2016).
- [14] McDonald, C.F., Massardo, A.F., Rodgers, C. and Stone, A., “Recuperated gas turbine aeroengines, part I: early development activities”, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 80(2) (2008), pp.139-157.
- [15] McDonald, C.F., Massardo, A.F., Rodgers, C. and Stone, A., “Recuperated gas turbine aeroengines, part II: engine design studies following early development testing”, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 80(3) (2008), pp.280-294.
- [16] McDonald, C.F., Massardo, A.F., Rodgers, C. and Stone, A., “Recuperated gas turbine aeroengines. Part III: engine concepts for reduced emissions, lower fuel consumption, and noise abatement”, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 80(4) (2008), pp.408-426.
- [17] Capstone Turbine Corporation. (2015), “Combined Heat and Power Systems Technology Development and Demonstration 370 kW High Efficiency Microturbine”, Final Technical Report. ER-3001334-000-00.
- [18] Capstone Turbine Corporation. (2008), “Advanced MicroTurbine Systems (AMTS)”, Final Technical Report -C200 MicroTurbine –Ultra-Low Emissions MicroTurbine.
- [19] Head, Adam Joseph. (2012), “Scaling 3-36kW Microturbines”, *ASME Turbo expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 5 (2012), Copenhagen, Denmark, GT2012-68685.
- [20] Shah, R.K. (2005), “Compact Heat Exchangers for Microturbines”, *Micro Gas Turbines*. p. 2-1 – 2-18, Rochester, NY, USA, RTO-EN-AVT-131.
- [21] Vick, M. Young, T., Kelly, M., Tuttle, S., Hinnant, K. “A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design, Concept, Cycle Analysis, and Recuperator Component Prototype Tests”, *ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air*, Vol. 8 (2016). DOI 10.1115/GT2016-57780.

- [22] Vick, Michael J., Andrew Heyes, et Keith Pullen. "Design Overview of a Three Kilowatt Recuperated Ceramic Turboshift Engine". *ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air*, Vol. 5 (2009). DOI 10.1115/GT2009-60297.
- [23] Vick, Michael J. "Compact radial counterflow recuperator". *U.S. Patent* 8,573,291, issued November 5, 2013.
- [24] Delta Motorsports, "Delta Launches MiTRE Range Extender", [en ligne], <http://www.deltamotorsport.com/news/2016/delta-launches-mitre-range-extender/>
- [25] Frazier, W. E. "Metal additive manufacturing: a review" *Journal of Materials Engineering and Performance*, (2014), Vol. 23, No. 6, pp. 191 7-1928
- [26] Aidibe, A., Tahan, A., and Brailovski, V. "Metrological investigation of a selective laser melting additive manufacturing system: A case study", *IFAC-PapersOnLine* (2016), Vol. 49, No 31, pp. 25-29.
- [27] Stimpson, CK., Snyder, JC., Thole, KA., and Mongillo, D. "Roughness Effects on Flow and Heat Transfer for Additively Manufactured Channels", *ASME. Journal of Turbomachinery*, (2015). DOI 10.1115/1.4032167.
- [28] McDonald, CF. and Rodgers, C. "Ceramic Recuperator and Turbine: The Key to Achieving a 40 Percent Efficient Microturbine", *ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 1 (2005). DOI 10.1115/GT2005-68644
- [29] McDonald, CF. "Low Cost Recuperator Concept for Microturbine Applications", *ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 2 (2000). DOI 10.1115/2000-GT-0167
- [30] Rodgers, C. "Microturbine Cycle Options", *ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 1 (2001). DOI 10.1115/2001-GT-0552.
- [31] Takehara, I., Tatsumi, T., and Ichikawa, Y. "Summary of CCGT302 Ceramic Gas Turbine Research and Development Program", *Journal of engineering for gas turbines and power*, (2002), Vol. 124, No. 3, pp. 627-635.
- [32] Thulukkanam, K. "Heat Exchanger Design Handbook Second Edition", *CRC press*, (2013), Chapter 4 : Compact Heat Exchangers, pp. 201-292.
- [33] Mu, D., and Shen, B. "Oxidation of boronized CoCrMo alloy", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 28(3) (2010), pp. 424-428.

- [34] Sun, S., Koizumi, Y., Kurosu, S., Li, Y., and Chiba, A. “Phase and grain size inhomogeneity and their influences on creep behavior of Co-Cr-Mo alloy additive manufactured by electron beam melting”, *Acta Materialia*, Vol. 86 (2015), pp. 305-318.
- [35] Norris, R. H., “Some Simple Approximate Heat Transfer Correlations for Turbulent Flow in Ducts with Surface Roughness”, *Augmentation of Convection Heat and Mass Transfer*, (1970), pp. 16-26.
- [36] Cengel, Y.A. “Heat & Mass Transfer: A Practical Approach”, *McGraw Hill Edition*, ISBN: 978-0-07-063453-4

